

Resumen

El presente proyecto responde a la necesidad de la empresa *Beyond MyLeisure S.L.* de obtener una fresadora de control numérico por computadora (CNC) de tres ejes para facilitar el mecanizado de ciertas partes clave de las guitarras eléctricas confeccionadas por esta entidad. Se pretende diseñar y construir una máquina capaz de mecanizar madera dejando unos acabados dentro de las exigencias de la empresa.

Para ello se hará un primer análisis genérico sobre el mundo de las fresadoras y del control numérico: su funcionamiento, disposición de los ejes, modo de transmisión de movimiento y tipo de estructura a usar y disponibilidad de piezas en el mercado.

Posteriormente se elaborará un diseño por partes de la máquina, separándola por ejes para poder luego hacer un diseño integral de toda la fresadora. Este modelo servirá de guía para poder efectuar los pedidos de piezas con el presupuesto disponible y poder empezar con la construcción de la máquina real.

Este proyecto pretende mostrar todo el proceso evolutivo desde una idea inicial y la intención de obtener una máquina hasta la elaboración física de la máquina pasando por toda la fase de investigación y diseño conceptual.

El alcance del trabajo no llega a abarcar toda la parte electrónica y de programación de la máquina ya que serán exploradas en una etapa posterior junto con las partes de construcción que queden pendientes para alcanzar la fase de funcionamiento y operación de la máquina.

Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
1. PREFACIO	5
1.1. Origen del proyecto	5
1.2. Motivación	8
1.3. Requerimientos previos	9
2. INTRODUCCIÓN	15
2.1. Objetivos del proyecto.....	16
2.2. Alcance del proyecto.....	17
3. ESTUDIO PRELIMINAR	18
3.1. Estado del arte	18
3.2. Análisis de alternativas	23
4. DISEÑO DE LA FRESADORA CNC	31
4.1. Estructura base	32
4.2. Eje Y	35
4.3. Eje X	41
4.4. Eje Z	44
4.5. Motores	48
4.6. Diseño final.....	51
5. PROGRAMACIÓN	54
6. ESTUDIO ECONÓMICO	56
6.1. Inversión inicial.....	56
6.2. Estudio de viabilidad	58
7. CONSTRUCCIÓN	61
7.1. Mecanizado	62
7.2. Eje Y	64
7.3. Eje X	65
7.4. Eje Z	67
7.5. Ensamblaje final.....	68
8. ESTUDIO MEDIOAMBIENTAL	69

9. PLANIFICACIÓN	70
CONCLUSIONES	74
AGRADECIMIENTOS	77
BIBLIOGRAFÍA	79
Referencias bibliográficas	79
Bibliografía complementaria	79
ANEXOS	81
Anexo 1: Taller de construcción RepRapBCN3D+	81
Anexo 2: Hoja de características de la Kress 1050 FME	85
Anexo 3: Cálculos de resistencia de materiales	86
Selección de perfil.....	86
Diámetro del husillo.....	87
Anexo 4: Selección del motor paso a paso	89

1. Prefacio

1.1. Origen del proyecto

Hace 8 años, a raíz de una cultura musical que se ha querido inculcar desde la infancia en casa tocando el piano, la guitarra, la batería, el solfeo o el canto, Salvador Soriano, padre de familia, decidió iniciarse a su vez en el mundo de los instrumentos musicales aprendiendo a tocar la guitarra. Tocar un instrumento era un sueño que le perseguía desde su niñez, que le acompañó toda su vida y finalmente había decidido afrontar ese reto y lanzarse a por ese sueño. Durante años estuvo asistiendo a clases semanales para perfeccionar su dominio de este instrumento, pasando por las habituales fases de frustración inicial, esfuerzo y muchas horas de práctica hasta que finalmente fue capaz de arrancar una melodía con el movimiento de sus dedos sobre las cuerdas que le hizo sentir feliz y orgulloso. Esta gran satisfacción hizo que su dedicación fuera en aumento, completando su formación de forma autodidacta, comprando revistas especializadas o estudiando partituras de algunas de las canciones más famosas de las últimas décadas.

A medida que pasaban los años, su amor por las guitarras ganaba más y más fuerza. Como la mayoría de los que se inician en el arte de la guitarra, empezó a tocar con una guitarra clásica que, mediante su forma, su material, la complejidad de su diseño y la vibración de sus cuerdas, devuelve de forma natural las diferentes notas que componen la escala musical. Con el tiempo llegó el salto a las famosas guitarras eléctricas, unas guitarras más compactas que, gracias a la intervención de todo un conjunto de aparatos y dispositivos electrónicos, permiten alcanzar toda una nueva gama de sonidos que revolucionaron el mundo de la música hace unas décadas.

Este nuevo horizonte de posibilidades que abrió el paso a la guitarra eléctrica fue todavía más apasionante, descubriendo los diferentes tipos de frecuencias y sonidos a los que se podía llegar con tan sólo mover una palanca, tocar cuatro botones o girar un par de ruedas.

Al principio este nuevo instrumento destacó por las posibilidades que ofrecía a nivel musical, siendo tan sólo un medio para llegar a un fin, el de sentir el placer de tocar. Poco a poco este objeto intermediario entre la partitura, el movimiento de dedos y manos y la música que salía de él fueron captando su interés.

¿Qué tipo de dispositivos hay aquí instalados para poder conseguir estos resultados?
¿Cómo funcionan estos dispositivos y cómo se decide cuáles hay que usar? Fueron algunas de las preguntas que empezaron a surgir y que le picaron la curiosidad.

Ahí empezó la búsqueda acerca de temas mucho más concretos del mundo de las guitarras: el funcionamiento de las pastillas, el efecto de las ruedas que controlan el sonido, el motivo por el cual algunas guitarras lleven una palanca, con la que todo el mundo ha visto jugar a grandes guitarristas de *Rock* durante sus conciertos,...

Esta curiosidad acabó llevando a la inscripción a un taller de construcción de guitarras eléctricas de dos semanas de duración. Durante este curso, los matriculados vieron la transformación desde unas simples tablas de madera a la obtención de una guitarra de verdad que sonaba perfectamente. En el curso de este taller fueron muchas las herramientas empleadas para dar forma al instrumento, como fresas, sierras, rectificadoras, herramientas de pulir, de taladrar, de cortar, sin olvidar la incorporación y conexión de todos los elementos relacionados con la electrónica de la guitarra.

Este taller fue apasionante para Salvador, encantado con la idea de haber creado con su propio esfuerzo una guitarra con la forma que él imaginó usando los tipos de madera que quiso, obteniendo una guitarra hecha completamente a medida, una guitarra hecha por y para él. Una idea empezó a nacer en su interior; ¿y si me dedicase a esto? Esta idea fue madurando poco a poco hasta llevar a la inscripción a un segundo curso de construcción de guitarras, con el objetivo esta vez de estar mucho más pendiente de todos los detalles técnicos: herramientas y máquinas usadas, tolerancias aceptadas, tipos de maderas recomendados, tipo y marca de componentes electrónicos, aislamientos, herramientas de medida, dimensiones, proveedores, técnicas y consejos para realizar lo mejor posible cada etapa del proceso de elaboración de la guitarra.

Siguiendo los consejos del responsable del taller y con las notas tomadas durante ambos cursos acabó de madurar la idea de crear una empresa dedicada a la construcción y venta de guitarras eléctricas, *Beyond MyLeisure S.L.* creando la marca *GreyHound Guitars*. Con tal de poder empezar la construcción de guitarras había que comprar las máquinas y herramientas necesarias para poder mecanizar la madera durante todo su proceso de conformado. Así es como empezaron a llegar las primeras máquinas: una fresadora vertical, una sierra de disco, una sierra vertical y una pulidora. Con la llegada de los pedidos de maderas empezó la construcción de la primera guitarra. Los errores cometidos y los obstáculos a superar fueron apareciendo a lo largo de todo el proceso, dejando claro que sería de gran ayuda la existencia de otras máquinas para facilitar y acelerar algunos pasos. Como ingeniero, empezó la creación de máquinas personales diseñadas especialmente para su aplicación en guitarras. Este proceso creativo llevó al diseño y construcción de 5 máquinas o complementos de máquinas nuevos que se usan con cada nueva guitarra que se crea.

La necesidad de poder agilizar un poco el proceso constructivo de la guitarra hizo aparecer hacer unos meses la necesidad de tener una fresadora de control numérico.

Antes de entrar en materia, en la parte inicial del trabajo aparecerán palabras del sector de las guitarras, palabras que quizás no se entiendan si no se está familiarizado con este instrumento. A continuación se hace una breve explicación acerca del vocabulario de las guitarras para facilitar la comprensión del texto llegado el momento.

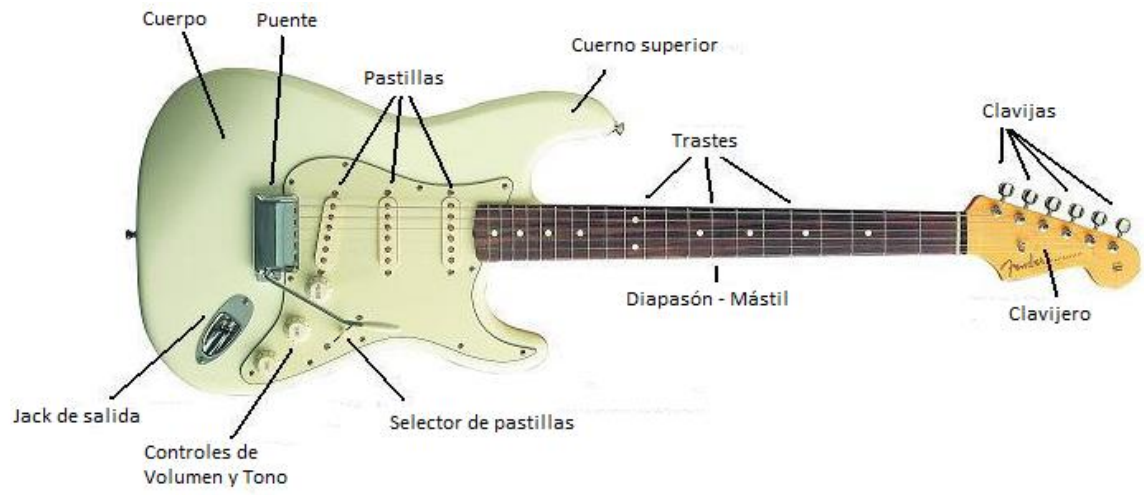


Figura 1.1. Representación de una guitarra y sus partes

La guitarra eléctrica está compuesta por dos partes principales: el cuerpo (en blanco) y el mástil. La parte del mástil se puede separar a su vez en dos partes: el clavijero a la derecha, donde se fijan y tensan las cuerdas y la zona de los trastes, donde se apoyan los dedos sobre las cuerdas a la hora de tocar. Los trastes están separados por unas líneas marcadas por una pequeña placa metálica incrustada en una ranura.

En la zona del cuerpo se pueden ver varios de los elementos básicos de una guitarra eléctrica: el jack de salida para conectarla a un amplificador, dispositivos como el control de volumen y tono o el selector de pastillas y las pastillas. Las guitarras eléctricas deben una parte esencial de su funcionamiento a unas pastillas hechas a base de una bobina e imanes que se sitúan en el cuerpo de la guitarra, justo debajo de las cuerdas, donde las vibraciones de las cuerdas provocan cambios en el campos magnético los imanes, induciendo una corriente a las bobinas que luego llega al resto de componentes electrónicos. Esta corriente inducida es muy débil y es la que se acaba escuchando tras su correcta amplificación.

Otra parte esencial de la guitarra es lo que se conoce como alma. El alma es una varilla metálica, en general de acero inoxidable, que se aloja dentro del mástil de la guitarra para ofrecer mayor resistencia frente a la tensión y la fuerza que ejercen las cuerdas sobre el mástil (unos 600 N aproximadamente entre las 6 cuerdas).

1.2. Motivación

Después de prácticamente 4 años cursando el grado en Tecnologías Industriales, 210 créditos aprobados y un último Q8 por superar, haciendo memoria de todo lo que se había aprendido en las diferentes asignaturas y trabajos realizados destacó una cosa: las actividades más interesantes y más motivantes eran sin duda aquellas en las que se había podido obtener un resultado material de todo el estudio realizado. En este sentido tanto la viga de la asignatura de Resistència de Materials como la pinza de Mecànica dels Medis Continus fueron dos de los retos más entretenidos e interesantes en cuanto a trabajos justamente por su parte material, y la satisfacción personal que se siente al acabar teniendo delante un objeto completamente calculado y diseñado por uno mismo es una sensación increíble.

A parte de eso, toda la parte dedicada a máquinas de la asignatura de Sistemas de Fabricación resultó ser muy interesante, y más aun con las prácticas de la asignatura y teniendo la oportunidad de ver cada fin de semana algunas de esas máquinas en funcionamiento para la elaboración de guitarras, entendiendo su funcionamiento, como se regulan, las velocidades de corte que se usan, dimensiones de cabezales, superficies a cortar y ver así la aplicación en el mundo real de los conceptos aprendidos.

Hace ya unos años que el mundo de las impresoras 3D se ha vuelto más conocido y cada vez más presente en esta carrera, ya sea a través de empresas que vienen durante el Fòrum o la sección de impresión 3D de *RepRapBCN* que hay en la escuela. Durante el último año han aparecido muchas ofertas de talleres de impresoras 3D en la UPC y en el resto de España y parecía un tema muy atractivo. Resultó serlo todavía más tras la visita a la *Fundació CIM* durante las prácticas de la asignatura de Sistemas de Fabricación, donde se pudo ver toda la planta dedicada a la impresión 3D. Ver el funcionamiento de estas máquinas y su forma de trabajar fue todavía más motivador de cara a enfocar un Treball de Final de Grau hacia este sector de las máquinas de control numérico.

Finalmente pues, entre el interés por el mundo de las máquinas y la previsión por parte de la empresa *Beyond MyLeisure* de hacerse con una fresadora de control numérico, apareció la oportunidad de hacer un trabajo con un abanico muy amplio de temas a tratar con algunos aspectos importantes vistos durante la carrera: el diseño de una máquina, el estudio de piezas disponibles en el mercado con tal de generar un diseño posible de hacer realidad con piezas comerciales, el contacto con proveedores para hacer pedidos de piezas y materiales necesarios después de consultar catálogos y precios disponibles, toda la parte electrónica que hace posible la parte del control numérico y finalmente su construcción.

1.3. Requerimientos previos

Con tal de llevar a cabo el diseño de una fresadora de control numérico queda muy claro que antes de todo es necesario entender qué es una fresadora de control numérico y cómo funciona.

La primera pregunta es fácil de contestar, en pocas palabras, una fresadora de control numérico es una máquina de mecanizado por arranque de viruta cuyo movimiento puede ser programado para que se efectúe de forma autónoma. En cuanto a la segunda, es necesario reflexionar más sobre el asunto y dedicarle horas a la comprensión de esta máquina. La fresadora de control numérico a diseñar es de 3 ejes, y por lo tanto es esencial entender, observando y estudiando modelos de otras máquinas similares cómo funcionan estos ejes, cómo se pueden mover independientemente los unos de los otros y combinarse entre ellos para, junto con el movimiento de rotación del cabezal de la fresa, poder crear geometrías de muchos tipos, más o menos complejas, formas redondeadas, líneas diagonales, pendientes, esquinas, etc. Para esta parte era necesario hacer una búsqueda en profundidad sobre las máquinas de control numérico y más concretamente las fresadoras para conocer el tipo de mecanismos empleados normalmente en su estructura, los sistemas de transmisión, los motores, los materiales, la disposición de los ejes, el sistema de control, etc.

Esta búsqueda permitiría tener una idea global sobre el funcionamiento de las fresadoras de control numérico, una vista de conjunto que haría posible un primer paso hacia cosas más concretas. Para esta parte fueron muy útiles algunos conceptos adquiridos durante la asignatura de Sistemas de Fabricación ^[1] como el paso, la velocidad de avance, velocidades de corte, superficie de viruta a arrancar o términos de potencia y fuerzas de corte. Estos conocimientos previos podían ayudar al entendimiento de máquinas comerciales patrocinadas en las páginas web de sus correspondientes fabricantes y así poder tener una primera visión del estado del arte de las máquinas CNC hoy en día.

Antes de poder lanzarse en este proyecto era necesario conocer el propósito de la máquina, aquello para lo cual se usaría. Para ello, *Beyond MyLeisure* tenía que dar una explicación de aquello para lo cual se utilizaría la fresadora. Las guitarras eléctricas deben una parte esencial de su funcionamiento a las pastillas que, colocadas justo debajo de las cuerdas (a entre 3 y 5 mm), tienen que alojarse dentro de la estructura de la guitarra, encajadas en un agujero o hueco hecho a medida en el lugar adecuado, para su correcto funcionamiento.



Figura 1.2. Izquierda: pastillas de guitarra. Derecha: guitarra con pastillas integradas



Figura 1.3. Fotografías de guitarras de *Beyond MyLeisure* con huecos para pastillas

Hasta ahora esta cavidad se hacía mediante una fresadora vertical de forma más intuitiva, con la ayuda de una plantilla de metacrilato previamente diseñada.

Del mismo modo que es necesario colocar las pastillas en el cuerpo, se necesita un espacio también para otros componentes de la guitarra como la regulación del volumen, el juego con el tipo de efecto de sonido que se quiere crear y la zona donde se encuentran los componentes electrónicos como filtros y condensadores que luego mandarán la señal resultante a los amplificadores externos que transmitirán el sonido final de la guitarra. Todas estas partes podrían hacerse gracias a una fresadora CNC.

La máquina de control numérico podría usarse para: fresar la cavidad en la cual se colocarán las pastillas, preparar los agujeros para los dispositivos de control de sonido, hacer el cajón para instalar toda la circuitería y electrónica de la guitarra, cortar las ranuras para los trastes del mástil y crear la ranura en la que se colocará el alma de la guitarra.



Figura 1.4. Fotografías de zonas mecanizadas de guitarras de *Beyond MyLeisure*



Figura 1.5. Mecanizado de cuerpo de guitarra



Figura 1.6. Corte de las ranuras del mástil



Figura 1.7. Proceso de mecanizado del mástil para el alma



Figura 1.8. Ranura para el alma

Otro requerimiento imprescindible antes de poder lanzarse en el diseño de una máquina es conocer las dimensiones con las cuales tendría que trabajar, es decir, el tamaño de las piezas que habría que mecanizar para poder prever el recorrido necesario en cada uno de los ejes de la máquina y diseñar un aparato en consecuencia. Para ello era necesario volver al origen de este proyecto: la mecanización de parte de una guitarra eléctrica. Al querer trabajar sobre la guitarra, es evidente que la guitarra tiene que caber en la máquina, dando ya una primera idea de las dimensiones necesarias. Antes de decidir nada, es bueno intentar tener siempre una visión a largo plazo de lo que podría llegar a hacer la fresadora CNC, es decir, otros usos que se le pudiera dar a parte de la mecanización de cavidades dentro del cuerpo de la guitarra.

En base a esta reflexión aparece la idea y la posibilidad de usarla para mecanizar también parte del mástil de la guitarra, si resulta ser tan precisa como se quiere. Combinando ambas cosas se tiene que tener en cuenta la cabida de un cuerpo de guitarra, sobre todo de cara a la anchura, y la de un mástil, por separado, que es más largo que el cuerpo. En el mundo de las guitarras eléctricas estas dos partes se crean de forma independiente y se acaban encajando justo antes de las etapas finales de procesos a los que someter a la guitarra como los últimos pulidos o la aplicación de laca.

En este caso, ese estudio ya había sido hecho previamente por la empresa *Beyond MyLeisure* cuando apareció la idea de obtener una fresadora de control numérico. La empresa había pasado ya un tiempo con esta idea y había llegado hasta la fase de búsqueda de máquinas comerciales que pudieran satisfacer sus necesidades. Eso fue de gran ayuda pues permitió saber ya rápidamente cuales eran las exigencias y requerimientos para una futura máquina CNC personal.

Familiarizarse con toda la parte electrónica y de programación de la máquina también es importante, pues son el corazón que hace funcionar la máquina, el cerebro que mueve todos los diferentes músculos del sistema. Sin una buena programación esta máquina no sirve de absolutamente nada y pierde además todo su propósito: ser una máquina que puede mecanizar de forma independiente una pieza o forma concreta. Para ello es importante entender la forma en la que trabaja un programa de este tipo y sobretodo conocer bien el tipo de archivos con el que trabaja para luego convertir el modelo 3D de una pieza en una lista de instrucciones escritas en un código que la parte electrónica de la máquina lee y acaba convirtiendo en una serie de movimientos de ejes para lograr obtener la pieza deseada.

2. Introducción

Cuando apareció la necesidad por parte de la empresa *Beyond MyLeisure* de conseguir una fresadora de control numérico, iniciaron búsquedas sobre una máquina que cumpliera con las exigencias y necesidades fijadas para su aplicación en el campo de la construcción de las guitarras eléctricas. Durante esta fase de selección por parte de la empresa, llegaron a la elección de un modelo concreto de un fabricante alemán: el modelo High-Z S-1000/T de CNC Step^[2].

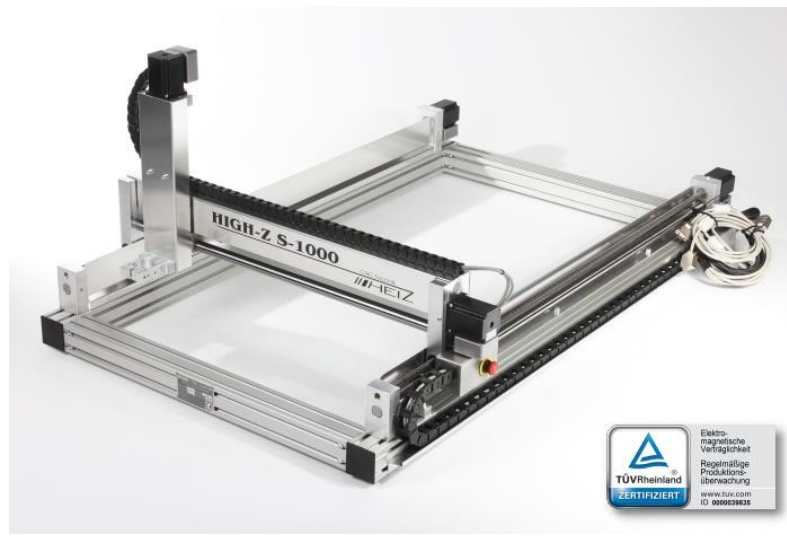


Figura 2.1. High-Z S-1000/T de CNC Step

Esta máquina CNC cumple con todas las condiciones requeridas para el tipo de trabajo que tiene que hacer. Es de buena calidad y con una precisión de 0,01 mm, más que suficiente para lo que se necesita. Tiene un recorrido de desplazamiento en el plano horizontal de 1000 x 600 mm y un recorrido vertical de 110 mm, lo que acaba dando a la máquina unas dimensiones totales de 1330 x 870 x 575 mm (incluyendo los motores), de 51 kg de peso y una velocidad de corte máxima de 8000 mm/min.

Estos datos marcarán una primera línea a seguir de cara al diseño y construcción de la fresadora CNC personal y de sus prestaciones.

2.1. Objetivos del proyecto

“Diseño y construcción de una fresadora de control numérico”. El título de este trabajo de final de grado deja ya muy claros cuáles son los grandes objetivos de este proyecto. Este trabajo tiene por supuesto una importante componente teórica, sobre todo en su parte inicial con el estudio, aprendizaje y entendimiento de los diferentes subsistemas que componen una máquina como la fresadora de control numérico pero su mayor peso es sin duda de carácter práctico ya que la finalidad de este proyecto es la de obtener una máquina CNC operativa que funcione correctamente.

Una máquina de control numérico es un dispositivo que se puede comprar a muchos proveedores en todo el mundo, con modelos tan buenos como se puedan pagar, con un gran rango de dimensiones, precisiones y aplicaciones. Así que ¿para qué fabricar una máquina personal? Eso comporta muchas horas de trabajo y muchos riesgos, menor fiabilidad, menos seguridad de tener un correcto funcionamiento, ausencia de soporte técnico para los problemas que puedan surgir y sin garantía de reparación o remuneración en caso de mal funcionamiento de la máquina. La respuesta es sencilla: el precio. La máquina High-Z S-1000/T de *CNC Step* vista anteriormente cumple con todos los requerimientos necesarios y tiene un coste de 4 323,00 € en la página del fabricante, gastos de transporte no incluidos.

Esa fue la motivación por parte de *Beyond MyLeisure* para decidir construir su propia máquina de control numérico. Uno de los grandes objetivos del trabajo será pues lograr construir una máquina con unas prestaciones muy similares a la de la máquina nombrada por un precio menor, poniendo como valor de referencia unos 1 500 € de coste total, aproximadamente un tercio del coste de la máquina de *CNC Step*.

Para poder limitar los esfuerzos sufridos por el conjunto de la máquina, facilitar el trabajo de los motores y reducir el gasto energético, sobre todo para su funcionamiento a largo plazo, sería bueno mantener tan bajo como se pueda el peso de la máquina.

Los objetivos se pueden resumir en la obtención de una fresadora de control numérico real, con unas características que puedan satisfacer a la empresa y una optimización del precio total y del peso final del conjunto.

2.2. Alcance del proyecto

Para lograr alcanzar estos objetivos, la metodología a seguir será la de investigación inicial para familiarizarse con el mundo de las fresadoras CNC para poder elaborar un primer diseño aproximado de la máquina que, combinado con las consultas de catálogos de fabricantes y piezas disponibles en el mercado, permitirán realizar un diseño final con las medidas, piezas y componentes que se instalarán. Este diseño final será la referencia a seguir de cara a efectuar todos los pedidos de piezas a proveedores para poder finalmente construir la fresadora de control numérico.

Este proceso se seguirá con el fin de construir una máquina para un fabricante de guitarras eléctricas. Se tendrá que garantizar el correcto funcionamiento del dispositivo en condiciones de trabajo, cumpliendo con las tolerancias aceptadas en el mecanizado de piezas, todo eso a largo plazo. El alcance de este proyecto se limitará al diseño conceptual de la máquina y a su construcción. La parte de programación de la máquina se sale del ámbito de este proyecto pero ha sido estudiada para comprobar su posible implementación en la fresadora.

En principio el diseño de la máquina estará limitado al uso en esta aplicación en particular, no está prevista una construcción en masa de la máquina, sino solamente de una unidad. En caso de funcionar correctamente, su uso podría extenderse a una aplicación en el mecanizado y fresado de madera para cualquier otro propósito que no requiera piezas demasiado grandes ni con acabados superficiales y tolerancias más restrictivas de los que puede ofrecer esta máquina, aunque efectuar una modificación de la misma para trabajos con elementos mayores o menores no sería un trabajo difícil de conseguir a partir del modelo base.

3. Estudio preliminar

3.1. Estado del arte

El objetivo fundamental de los procesos de mecanizado por arranque de viruta es la obtención de una pieza con la geometría y el acabado deseados. La operación consiste en arrancar de la pieza bruta los excedentes de material mediante el uso de herramientas de corte.

Este proceso es casi tan antiguo como el ser humano, cuando los primeros homínidos empezaron a elaborarse sus propias herramientas como armas de caza, herramientas de corte y demás utensilios empleados para algunas de sus tareas cotidianas. El mecanizado por arranque de viruta ha hecho evolucionar a la especie humana a través de la historia.

A medida que las necesidades y aplicaciones del ser humano se han hecho más complejas y precisas, mayores eran la dificultad y las exigencias para el sector del conformado de materiales. Para poder adaptarse a esta evolución de la demanda, los mecanismos de conformado de materiales han tenido que ir modernizándose con el paso del tiempo, con el objetivo de ofrecer también una mayor comodidad al fabricante.

Esto ha permitido pasar del tallado de piedras y lanzas con la ayuda de otras piedras, pasando por el uso de hachas, martillos y cincelos, sierras manuales, cuchillos, pulido a mano,... a las máquinas de arranque de viruta que existen hoy en día.

En un proceso de mecanizado por arranque de viruta hay que conocer los diferentes elementos que intervienen en él.

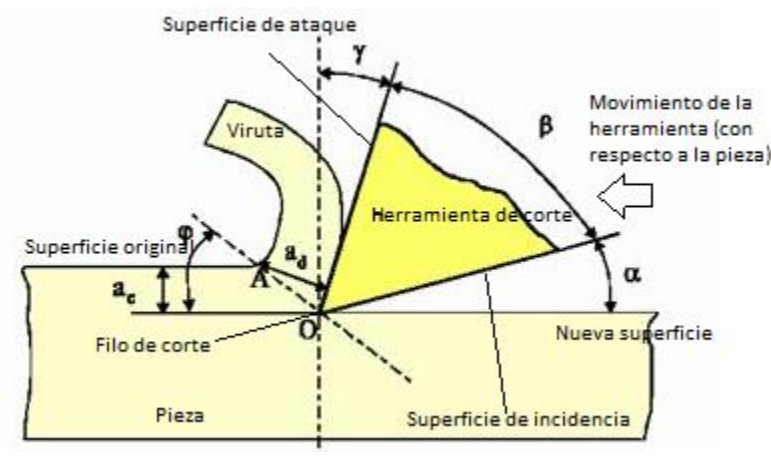


Figura 3.1. Representación de corte por arranque de viruta

En un proceso de arranque de viruta intervienen dos partes: la herramienta de corte y la pieza a mecanizar, con distintas partes a distinguir como se ve en la figura anterior. La superficie de ataque o superficie de desprendimiento es aquella que está en contacto directo con la parte de material a arrancar, aquella por la cual se desprenderá la viruta que vaya formándose a medida que avanza y se corta la pieza. La superficie de incidencia es aquella que está en contacto con la nueva superficie recién cortada. En la herramienta de corte se pueden encontrar varios ángulos que son variables según la herramienta que se use: el ángulo de ataque o de desprendimiento γ , el ángulo del filo β y el ángulo de incidencia α . El ángulo de incidencia a usar depende principalmente de la resistencia del material de la herramienta y de la resistencia y dureza del material a cortar mientras que el ángulo de desprendimiento depende además de eso del calor desarrollado durante la mecanización. En el corte intervienen también conceptos como la velocidad de corte, que es la velocidad relativa entre el filo de corte de la herramienta y la superficie de la pieza; el avance, que es la variación de la posición entre la herramienta y la pieza después de una vuelta; o la profundidad, que indica el espesor de material eliminado entre la superficie original y la nueva superficie creada después de la operación.

Existen varios tipos de mecanismos por arranque de viruta entre los cuales destacan el torneado, el taladrado, el rectificado, el serrado, el roscado y el fresado entre otros. Este último es el que interesa para este proyecto.

En el proceso de fresado se arranca material mediante el movimiento giratorio de la herramienta, llamada fresa, sobre la superficie de la pieza, contrariamente al torneado donde la que gira es la pieza. Existen diferentes tipos de fresas que se pueden clasificar en función de su aplicación o de su número de caras de corte. A continuación se ponen algunos ejemplos.

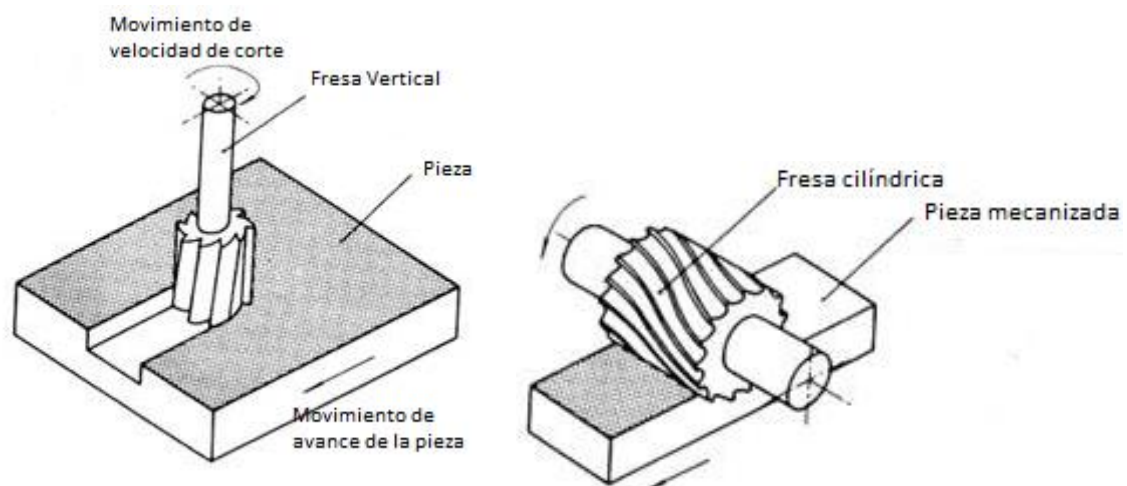


Figura 3.2. Representación de un fresado frontal/vertical y un fresado cilíndrico/horizontal



Figura 3.3. En orden: Fresa de disco, Fresa de tren de fresas y Fresa de módulo

Una pequeña comparación entre la fresa vertical o frontal y la fresa cilíndrica: la fresa frontal deja una mayor planitud con una rugosidad que se puede reducir añadiendo una arista complementaria y al tener más dientes en contacto con el material a la vez, permite aumentar el volumen de viruta arrancada por unidad de tiempo de un 15%. La fresa cilíndrica en cambio presenta más riesgos: al tener pocos dientes tocando la superficie su eje puede flexar y dejar una planitud peor, con una rugosidad mucho más dependiente del avance.

Los procesos de fresado son llevados a cabo por unas máquinas llamadas fresadoras. La primera máquina de fresar fue construida en 1818 en Estados Unidos con el propósito de agilizar la construcción de fusiles. Tras demostrar su utilidad poco a poco fueron apareciendo innovaciones de la fresadora, perfeccionando su funcionamiento, su diseño, sus aplicaciones y su comodidad hasta convertirla en una máquina imprescindible y básica del sector del mecanizado.

Las fresadoras permiten mecanizar diversos tipos de materiales como la madera, el acero, la fundición de hierro, otro tipo de metales o plásticos o todo tipo de superficie. En las fresadoras tradicionales, la pieza se desplaza acercando la zona a mecanizar a la herramienta de corte de la máquina para obtener diferentes tipos de formas y acabados.

Las numerosas aplicaciones han dado lugar a la creación de varios tipos de fresadoras, con una base común pero diseños y formas de funcionar muy distintos como por ejemplo la fresadora vertical, la fresadora horizontal, la fresadora copiadora o la fresadora universal, entre otras.

En la década de los 40, con la intención de elevar la producción de las máquinas aparecieron los sistemas de control numérico por computadora o CNC. Los sistemas CNC consisten en un código de letras y números que al combinarse provocan el movimiento de los diferentes ejes la máquina de la forma deseada o la activación de algún sistema de la máquina.

Las letras suelen referirse a un tipo de instrucción como los códigos G (referidos a movimientos) o códigos M (funciones auxiliares como arrancar, parar, lubricar, encender motores) y los números a un tipo de operación concreta. A continuación se ponen algunos ejemplos de comandos propios de un sistema dotado de un control numérico con su correspondiente efecto.

M00: Provoca la parada absoluta de la máquina y de todos sus elementos.

M02: Indica el fin del programa.

M03: Hacer girar el husillo en sentido horario.

G01: A este comando se le añaden unas coordenadas a continuación y la máquina se mueve hasta esa posición en línea recta.

G02: A este comando hay que añadirle unas coordenadas y un radio y la máquina se mueve circularmente en sentido horario por esa curva.

Los sistemas de control numérico han ayudado mucho a bajar costes de producción en empresas de mecanizado al bajar los costes de fabricación de muchas piezas con una calidad igual o mayor a con máquinas tradicionales.

La gran ventaja del control numérico es que no es necesario estar pendiente del proceso todo el tiempo, pues todo el mecanizado está automatizado y regulado informáticamente. Es importante controlar las piezas producidas para los estudios de calidad y comprobaciones de la pieza, pero no hace falta intervenir durante el mecanizado. El control numérico por computador supuso una revolución en el sector de la producción de piezas.

Estas máquinas presentan el inconveniente de ser costosas, cosa que supone un obstáculo e impedimento para clientes con medios más limitados como empresas pequeñas o particulares. Este obstáculo ha sido uno de los principales motores que ha impulsado la aparición de máquinas de control numérico personales y con ellas, la de páginas y foros creados por particulares para mostrar cómo se construyen este tipo de máquinas, sus diseños, programas usados y consejos para su elaboración para ayudar a otras personas en el inicio de sus propios proyectos.

Este tipo de soporte puede ser de gran ayuda para la construcción de una máquina CNC pues permite consultar otros trabajos, conocer algunos de los problemas más habituales a los que han tenido que enfrentarse otras personas a la hora de hacer sus inventos o ver qué camino han seguido a medida que se les presentaban distintas alternativas.

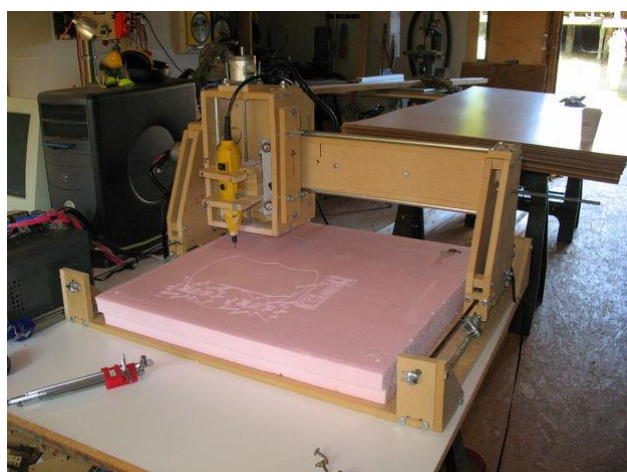
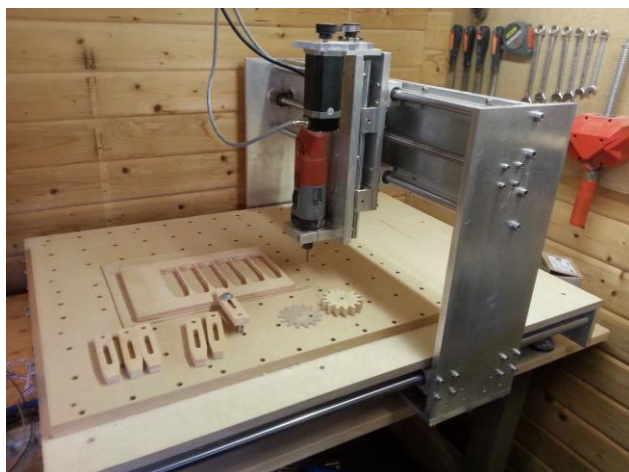


Figura 3.4. Fotografías de fresadoras CNC personales

La ventaja de hacer su propia máquina CNC es la posibilidad de hacerla de la forma que uno quiera, con el diseño deseado, las piezas que se quiera y el material que más convenga en función del gusto, el presupuesto o las exigencias necesarias para esta máquina. Por esa razón se pueden encontrar tanto máquinas de madera, como de acero o de aluminio.

3.2. Análisis de alternativas

Al momento de plantear la resolución de los principales objetivos del trabajo, inevitablemente hay que hablar de las posibles alternativas a contemplar tanto en su diseño, su construcción y su programación. La alternativa escogida en cada situación será clave para el posterior desarrollo del trabajo, condicionando muchos de sus parámetros y dando una línea clara a seguir.

A nivel mecánico, es necesario tomar una primera decisión sobre el material del cual estará hecha la máquina de control numérico, material que tendrá que aguantar todos los esfuerzos a los que estará sometida la máquina, su propio peso y que marcará su diseño, su forma y su construcción. Los posibles materiales a considerar son la madera, perfiles atornillados de acero o aluminio, el acero soldado y la fundición.

La madera es un material ideal en muchos aspectos para llevar a cabo la construcción de la máquina: es barata, fácil de mecanizar (se podrían hacer un gran número de piezas en casa, sin necesidad de un profesional), ligera y se le puede dar prácticamente cualquier forma deseada. Estas cualidades harían más sencillo el diseño de la máquina, teniendo una cuasi completa flexibilidad a la hora de crear las diferentes piezas que la compondrían, sin necesidad de tener que considerar unas medidas estándar y normalizadas. A esto se puede añadir la ventaja de la disponibilidad de herramientas para cortar, fresar, rectificar, pulir o taladrar la madera en casa, cosa que eliminaría la necesidad de encargar piezas con una geometría determinada, que tiene un coste añadido importante. A pesar de esto, para esta aplicación, la madera tiene importantes carencias. La madera es un material anisotrópico compuesto por fibras que tienen una orientación determinada y a causa de ello tiene buenas propiedades mecánicas en la dirección de sus fibras pero muy malas en sentido transversal a ellas. Para el tipo de geometría que cabe esperar para el diseño de la máquina y en previsión de posibles vibraciones que podrían aparecer durante su funcionamiento, es fácil ver que seguramente estará sometida a esfuerzos indeseados en direcciones indeseadas que podrían poner en peligro la integridad de la máquina. A esta inconveniente se le tiene que añadir que el propósito de esta máquina es el de mecanizar sobretodo madera pero no se quiere descartar la posibilidad de trabajar algún día con materiales metálicos. Para poder garantizar un buen funcionamiento de una máquina que mecaniza un cierto material, es fuertemente recomendable que la máquina esté hecha de un material más resistente que el que se quiere mecanizar, para evitar el posible caso de deformación permanente o incluso rotura de las piezas que componen la máquina al intentar mecanizar un material más resistente.

El hecho de querer usar la fresadora de control numérico como una máquina industrial acaba descartando del todo la madera como material candidato a la construcción de la máquina.

A pesar de aspectos ligados a su conformado y comodidad, se ve que por razones mecánicas no es recomendable usar la madera como material base para esta máquina.

El acero y el aluminio, al ser materiales metálicos, son isotrópicos y presentan propiedades mecánicas muy superiores a la madera, pudiendo soportar perfectamente tanto fuerzas longitudinales como transversales, garantizando pues una buena resistencia a los esfuerzos a realizar por parte de la máquina. Ambos materiales tienen precios más elevados que la madera (sobre todo el aluminio) y debido a su mayor resistencia presentan una mayor dificultad de ser mecanizados. Para ambos aparece la necesidad de trabajar con perfiles normalizados con medidas predeterminadas, perdiendo pues la libertad que daba la madera y haciendo más restrictivo y complejo el diseño de la estructura de la máquina. El aluminio presenta la ventaja de ser más ligero que el acero, permitiendo que con un par menor por parte de los motores de la máquina se pueda mover correctamente toda la parte móvil de la estructura. No obstante presenta una dificultad añadida respecto al acero, la soldadura, aunque no es imprescindible el uso de esta técnica para la unión de piezas. Es necesario tener también en cuenta la disponibilidad de diferentes perfiles, cosa en la cual es superior el aluminio ya que un gran número de máquinas industriales y de mecanismos están hechos de este material. A causa de la diferencia de peso entre el acero y el aluminio, se puede prever que si la estructura se hiciera de acero se necesitarían piezas más resistentes y por lo tanto mayores y más caras con tal de poder soportar toda la estructura, haciendo aparecer mayores tensiones y la necesidad de unos motores más potentes para poder moverla, cosa que haría que la diferencia de precio entre los dos materiales fuera compensada a nivel global de la máquina.

A pesar de tener unas propiedades mecánicas ligeramente inferiores y no contar con la opción de la soldadura; la disponibilidad de perfiles, el bajo peso y las recomendaciones halladas en numerosas páginas de fabricantes y aficionados a la construcción de máquinas hacen que el aluminio sea el candidato perfecto para construir la máquina, por encima del acero. Al perder la posibilidad de soldar las piezas entre ellas, la única solución para unir piezas es el uso de tuercas, tornillos y perfiles atornillados.

Una vez decidido el material que se usará es imprescindible estudiar los diferentes tipos de perfil que tendrán las barras que conformen la estructura de la máquina. En este apartado se pueden analizar diversos tipos de perfiles: perfiles cuadrados llenos, perfiles cuadrados vacíos y otros tipos de perfiles con geometrías más complejas como el perfil hepco.

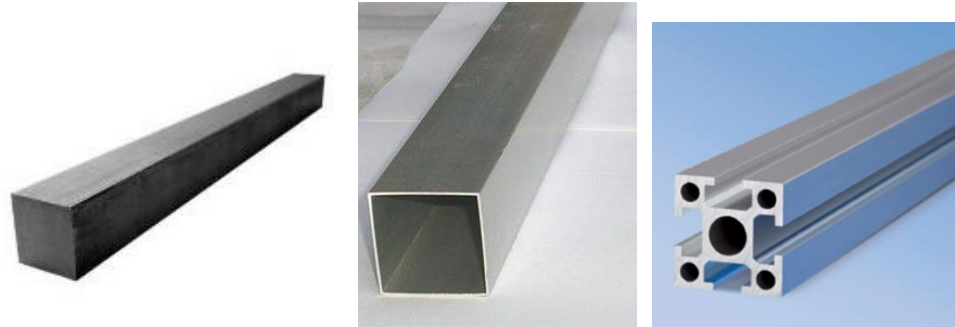


Figura 3.5. De izquierda a derecha: Perfil lleno, Perfil hueco y Perfil hepco

Rápidamente se puede descartar el perfil cuadrado lleno, ya que al tener tanto material hace aumentar de forma muy significativa el peso de la pieza, cosa que se quiere evitar para favorecer y facilitar su correcto funcionamiento. Hay que añadir que es un perfil muy poco en aluminio y eso haría más difícil su adquisición.

El segundo tipo de perfil es más adecuado por su relación de peso pero tiene el problema de tener un bajo momento de inercia, cosa que afectará directamente a sus prestaciones mecánicas y a como aguantará las fuerzas y tensiones que aparezcan en la máquina.

Finalmente, para el perfil hepco, su geometría ofrece una gran resistencia a la pieza y un peso menor que el primer perfil. Es importante comentar que las ranuras que tiene serían ideales para juntar diferentes piezas y colocar guías para el movimiento de la máquina. Este tipo de perfil presenta también la ventaja de tener agujeros roscados en sus extremos, cosa que facilitará la unión entre piezas.

De forma clara se ve que el mejor perfil que se puede escoger es uno del mismo tipo que el tercero, garantizando buenas propiedades mecánicas y facilitando futuras uniones entre piezas e incorporación de guías.

Una vez analizadas las diferentes alternativas de tipo mecánico hay que pensar en toda la parte móvil de la máquina, donde habrá que estudiar la forma de guiar el movimiento de los diferentes ejes de funcionamiento de la máquina, qué dispositivos harán moverse el cabezal de la máquina (tipo de motores a usar) y la forma de mover estos ejes (qué tipo de dispositivos se usarán para la transmisión del par proporcionado por el motor).

El sistema de guías es crítico en una máquina de control numérico y su buen funcionamiento o no repercutirá directamente en el acabado de las piezas que se obtengan al usarla. Unos ejes poco rígidos podrían hacer vibrar la máquina y tener un desgaste excesivo, unos ejes mal alineados impedirían su movimiento y podría llegar a romper algunas piezas o incluso los motores y unos ejes hechos de un material demasiado rugoso y mal lubricado podría dificultar su deslizamiento. Para el movimiento de los ejes se ha pensado en varias alternativas como las ruedas (sistema de funcionamiento similar al de una puerta corredera), un sistema de guías y patines o unas guías integrables dentro de la geometría de los perfiles de piezas.

Las guías basadas en mecanismos de ruedas han sido descartadas inmediatamente debido a la poca rigidez que aportan, que daría lugar a vibraciones en el conjunto de la máquina, cosa que hay que evitar a toda costa para un buen mecanizado de las piezas; el desgaste que sufrirían las ruedas; la necesidad de crear unas ranuras justo a la medida de las ruedas por donde pudieran rodar; la poca estabilidad que dan al conjunto y por las tensiones que podrían aparecer en su eje de giro por cargar con el peso de la máquina.

Las otras dos opciones en cambio parecen más adecuadas para el tipo de aplicación que se está haciendo. Son más precisas, mejores y se usan mucho en este tipo de aplicaciones. Teniendo en cuenta el tipo de perfil escogido y la existencia de guías que están hechas expresamente para encajar en él, siempre que sea posible se intentará usar una guía adaptada al perfil, ya que serán más fáciles de fijar, de una mida compatible con la geometría de la pieza y también más baratas.

Para poder hacer funcionar una máquina de control numérico, es evidente que son necesarios unos motores que la hagan moverse de la forma deseada. En este tipo de máquina la precisión y exactitud son claves para un buen funcionamiento y por lo tanto es de vital importancia tener unos motores precisos y fáciles de controlar. La decisión a tomar sobre el tipo de motor es muy sencilla, ya que el mejor motor para conseguir esta precisión con relativa facilidad es el motor paso a paso, donde el rotor gira dentro del estator gracias a unas corrientes que circulan por unas determinadas bobinas del estator que, gracias al efecto de unos imanes permanentes en el rotor, hacen que este se oriente en la dirección de estas bobinas. Jugando con esto, activando las bobinas correctas en la secuencia correcta se consigue hacer girar el rotor. En función del tipo de motor paso a paso se puede describir una vuelta entera según el número de pasos (4 o 8 en general). Estos pasos se pueden controlar fácilmente mediante una serie de impulsos binarios combinando unos y ceros para activar unas bobinas u otras, cosa que permite controlar perfectamente el movimiento del rotor.

Una vez se tienen la estructura, las guías y el tipo de motor, hay que pensar en la forma de transmitir el par y el movimiento del motor a la máquina para hacer que se mueva. Para esto se han encontrado varias opciones: barras roscadas, cintas o guías que incorporen un sistema motorizado integrado para mover la corredera sobre la guía.



Figura 3.6. De izquierda a derecha: Husillo con tuerca de bolas y Plataforma guiada por motor [3]

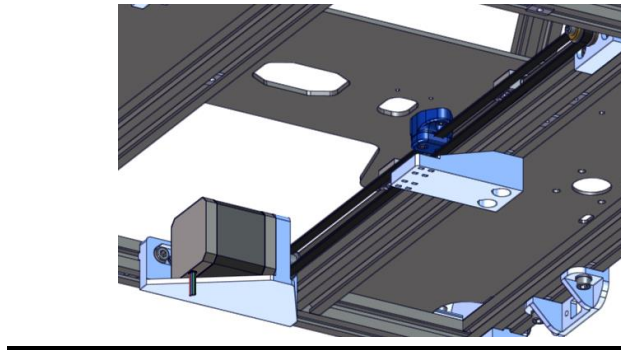


Figura 3.7. Representación de cinta guía de RepRapBCN3D+ [4]

Las barras roscadas en forma de tornillo sin fin (también llamados husillos) parecen una opción atractiva para mover la máquina en sus diferentes ejes, pudiendo ir directamente conectadas al motor y a la parte de la parte de la máquina que se tenga que mover fijada con una especie de tuerca que se movería a lo largo del eje según el sentido de giro. El precio de estas barras roscadas es relativamente bajo y permite tener un rango de precisión variable según el paso de la rosca escogida.

El sistema de cintas requiere una estructura más compleja: dos puntos de fijación en los extremos del recorrido para marcar la trayectoria de la cinta y hallar una forma de fijarla a la parte móvil. Las cintas tienen el problema de sufrir un desgaste mayor que las barras roscadas debido al material del cual estén hechas.

Las guías que incorporan un motor para mover la corredera son también una opción muy atractiva, garantizando un movimiento limpio ya que han sido diseñadas para ello pero tienen el gran inconveniente de tener un precio mucho más elevado que cualquier otra de las opciones, cosa que ha hecho que se descarten.

Ya para acabar se tiene que hablar del sistema de control de la máquina, de los dispositivos que harán funcionar los motores de forma que se efectúe el movimiento requerido en la máquina para mecanizar las piezas. Para este proyecto de final de grado se han contemplado dos posibles alternativas para el sistema de control: el “mini-ordenador” *Raspberry-Pi* o un dispositivo *Arduino*. Ambas alternativas son perfectamente compatibles con la máquina a diseñar pero se ha decidido usar un *Arduino* ya que es un dispositivo más conocido actualmente, con miles de diferentes aplicaciones que se pueden encontrar en la red y con más personas familiarizadas con su funcionamiento, cosa que será muy útil cuando se llegue a esta parte del trabajo.

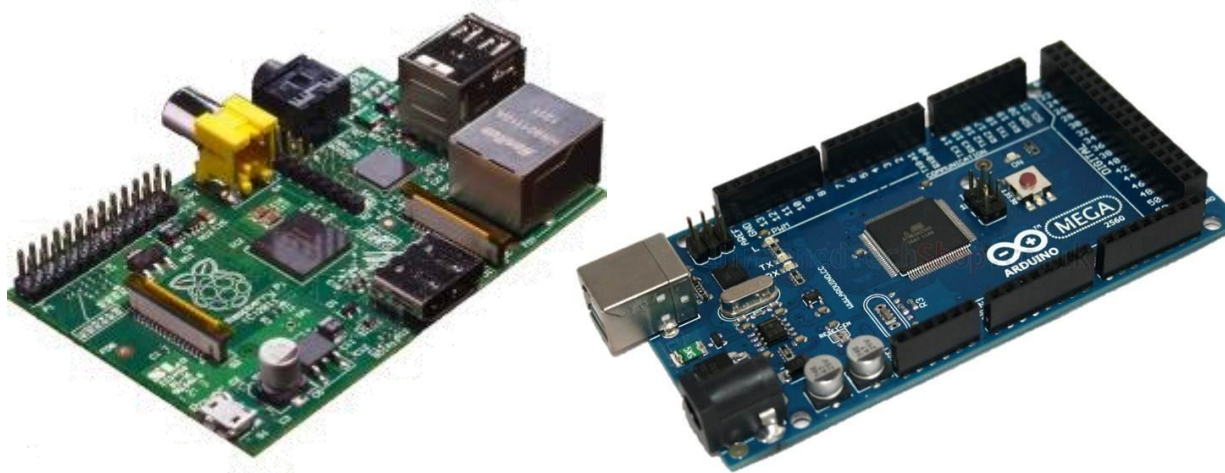


Figura 3.8. Izquierda: Dispositivo Raspberry Pi ^[5], Derecha: Dispositivo Arduino ^[6]

A esto hay que añadir que gracias a Joaquim Minguella y al equipo *RepRap BCN* de la *Fundació CIM* se ha tenido la oportunidad de realizar un taller de construcción de una impresora 3D, la *RepRap BCN3D+*, controlada mediante un *Arduino* que, al tener un sistema de funcionamiento similar al de una fresadora de control numérico, ha dado la posibilidad de poder consultar a profesionales y gente con experiencia en este sector. Esto ha permitido descubrir mejor el funcionamiento de este dispositivo electrónico, su programación, sus puntos fuertes y limitaciones y el tipo de software que se podría usar para controlar el conjunto de motores de la máquina. Se puede consultar la información referente a este taller en el Anexo 1.

Un último aspecto a discutir respecto al análisis de alternativas es la forma en que moverá la máquina para llevar a cabo el mecanizado de las piezas, es decir, decidir quién realizará los movimientos en cada eje, pudiendo ser la parte móvil la herramienta o la mesa, y por lo tanto la pieza. Existen muchos modelos de fresadoras de control numérico con diferentes posibilidades. Las combinaciones más habituales suelen ser por un lado el movimiento en el plano horizontal (ejes X e Y) llevado a cabo por la mesa y movimiento vertical (eje Z) por la herramienta, por otro lado máquinas donde los 3 movimientos sirven para mover la herramienta, estando la mesa y la pieza quietos y para acabar máquinas donde la mesa se mueve en un único eje del plano horizontal y la herramienta se mueve en los otros dos ejes restantes.

Este estudio es crucial para el trabajo pues condicionará toda la geometría del diseño de la máquina y la distribución espacial de los ejes.

Cualquier solución es válida para la resolución de este problema ya que todas llevan a un mismo resultado si luego el diseño y la programación se hacen adecuadamente. Por lo tanto hay que tomar esta decisión en base a otros aspectos como la complejidad en el diseño y la construcción, la comodidad en el uso, el espacio disponible para colocar la máquina y la cantidad de material necesario en cada caso.

Las máquinas con mesa móvil presentan un inconveniente respecto a una con mesa fija: el espacio que ocupan no es fijo debido al movimiento de la mesa y eso puede ser incómodo si el operario está justo al lado de la máquina. El espacio disponible en el taller de la empresa *Beyond MyLeisure* es limitado debido a la presencia de otras numerosas máquinas, por lo tanto es importante que la máquina sea lo más pequeña y fija posible.

Hay que tener en cuenta también el peso a mover y en este sentido el peso de la mesa sería previsiblemente mayor que el de la estructura que aguante la parte de la herramienta, necesitando pues un par mayor y por lo tanto un motor más potente.

Que la mesa sea móvil en todo el plano horizontal implica tener que hallar una manera de combinar ambos ejes sin que se estorben entre ellos, lo que necesitaría una estructura de soporte de la mesa más compleja, cosa que hace descartar la opción de un movimiento en dos ejes de la mesa.

Hay que ser previsor de cara a la parte de la programación de la máquina y comprobar la existencia de los diferentes programas libres disponibles en la red para este tipo de aplicaciones. Tras consultar la estructura de las máquinas para las cuales estaban diseñados los programas se ha visto que la mayoría están enfocados hacia una máquina con mesa fija y los tres ejes móviles en la herramienta. Poner un eje en la parte de la mesa implicaría invertir el sentido de funcionamiento de ese eje respecto a si estuviera en la herramienta, lo que implicaría modificar buena parte del programa. Si a eso se añade que se necesitaría un recorrido el doble de largo en ese eje para poder cubrir una misma superficie de madera, lo que implicaría más material para la construcción, una máquina más grande y más cara se decide usar la alternativa de incorporar el movimiento de los 3 ejes a la parte de la herramienta.

4. Diseño de la fresadora CNC

Una vez hecho el análisis de alternativas y tomadas algunas decisiones que condicionarán totalmente la estructura de la máquina se puede pasar a la etapa siguiente: pensar en un diseño para la fresadora CNC, un diseño cómodo que permita un correcto funcionamiento de la máquina, un movimiento cómodo y suave en sus tres ejes que permitan unos buenos cortes y buenos acabados en las piezas a mecanizar mediante un buen sistema de control y evitando al máximo las vibraciones en la máquina (debidas sobre todo al posible juego entre piezas).

Antes de lanzarse en un diseño detallado de la máquina era más fácil pasar por bocetos hechos a mano con una idea más general de cómo podría ser la estructura de la fresadora de control numérico parte a parte, identificando los diferentes ejes y pensando en su disposición para lograr un diseño cómodo, eficaz y que funcione correctamente. Para ello ha sido de gran ayuda todo el estudio preliminar sobre las máquinas de control numérico, con imágenes con modelos de diseño para ver las diferentes formas con las que se ha encarado el problema de la conceptualización de la máquina. Estos primeros bocetos, combinados con las especificaciones impuestas, han llevado a la elaboración de un conjunto poco a poco más compacto y más concreto para acabar llevando a un primer diseño integral preliminar de la máquina mediante el programa de diseño 3D *SolidWorks*. Este programa es muy cómodo para el diseño y representación de piezas o ensamblajes en 3D y la elaboración de planos. Es una herramienta muy útil para la visualización de aquello que se está creando y permite rectificar, medir, comprobar e incluso hacer ensayos de las estructuras creadas.

Este primer diseño ha sido analizado, estudiado y mostrado tanto al tutor de este proyecto como a la empresa que usaría la máquina para recibir las críticas, comentarios e ideas de cambios pertinentes para poder realizar unas mejoras de diseño. Esas mejoras, junto con la consulta de catálogos de piezas ofrecidas por fabricantes con sus respectivas dimensiones, pesos, materiales y geometría han permitido finalmente llegar a un modelo definitivo, con la geometría, la forma, las dimensiones, piezas y características que servirá de guía y se convertirá en la máquina de control numérico real.

A continuación se explica por partes la elaboración de este modelo, separándolo por su estructura básica y el diseño de sus distintos ejes de movimiento y la integración de los motores para llegar a su ensamblaje final y funcionamiento conjunto.

4.1. Estructura base

Al iniciar este proyecto y tener las primeras conversaciones con la empresa involucrada, puesto que ya estaba previsto el lanzamiento de la idea de construir una fresadora de control numérico, la empresa había realizado ya la compra del dispositivo que haría de motor de la fresadora. El dispositivo en cuestión es de la empresa alemana *Kress*, el modelo 1050 FME, un motor con 1050 vatios de potencia nominal que trabaja a velocidades regulables entre 10 000 y 29 000 revoluciones por minuto. La herramienta o broca se fija directamente a este motor para poder llevar a cabo las operaciones de fresado. La máquina venía ya equipada de un soporte con agujeros roscados para poder atornillarla cómodamente a una superficie asegurando una perfecta fijación. La ficha técnica del motor puede hallarse en el Anexo 2 de esta memoria.

En el apartado de análisis de alternativas se ha explicado que se usarían perfiles de aluminio como material estructural usando perfiles de tipo hepco. Este tipo de perfil es relativamente fácil de encontrar y puede ser suministrado por varios proveedores. Los diferentes proveedores de estas piezas ofrecen diferentes opciones de diseño y de tamaño para este tipo de perfil, siendo los más comunes los de 25x25, 30x30, 40x40, 45x45, 50x50 y 60x60 mm.

Ya que no se quiere tener una estructura excesivamente e innecesariamente pesada, lo que después se vería reflejado en un precio mayor, se quiere elegir un tamaño de perfil que cumpla con las especificaciones, que soporte bien las cargas y no haga que la máquina parezca demasiado grande. Para ello lo mejor es hacer un estudio de resistencia de materiales según el perfil usado debido a los esfuerzos que pueda recibir esa parte del sistema. Este estudio, que se ve reflejado en el Anexo 3, muestra que usando el perfil de 40x40 la estructura de la máquina es más que segura, soportando perfectamente las cargas y fuerzas presentes en la máquina.

Para la transmisión del movimiento se decidió en el análisis de alternativas que el sistema escogido serían las barras roscadas o husillos. Pero esto no basta para definir qué sistema se usará, existen muchos tipos de barras roscadas, siendo más adecuadas para según qué tipo de aplicaciones.

Un husillo es como un tornillo largo, de allí su conocido nombre de tornillo sin fin, y de diámetro generalmente grande que se usa para accionar o mover elementos. Este husillo suele venir con una tuerca, formando un sistema tuerca-husillo. En este conjunto, si se hace girar el husillo, se produce un desplazamiento lineal de la tuerca a lo largo del husillo, en un sentido u otro según el tipo de husillo y el tipo de rosca.

Al igual que un tornillo, un husillo está compuesto por filetes con un tamaño de rosca determinado que forman una hélice alrededor del núcleo de la barra. En función de la distancia que exista entre los filetes se puede determinar un parámetro llamado paso.

El paso define el avance longitudinal que se produciría sobre el husillo si éste diera una vuelta completa. De esta manera, es fácil establecer una relación $L = N \cdot p$, donde L es la distancia longitudinal recorrida en mm, N es el número de vueltas que ha dado el husillo y p el paso expresado normalmente en mm/vuelta. A partir del paso se puede definir otra variable llamada el avance o velocidad de avance en función de la velocidad de giro del husillo, definida por la relación $A = n \cdot p$ donde A es la velocidad de avance en mm/min, n la velocidad de giro del husillo en vueltas/min y el paso p en mm/vuelta.

El avance es un concepto clave en el sector del mecanizado por arranque de viruta pues será el que marque la cantidad de material que se arranca por unidad de tiempo (y por tanto, el tiempo de corte por pieza), sabiendo que si es demasiado elevado se podrían estropear tanto la herramienta como la pieza e incluso el conjunto de la máquina si aparecen fuerzas muy grandes. En el caso que interesa aquí, un avance demasiado grande puede provocar que la herramienta pegue “bocados” a la madera, arrancando grandes trozos de material no deseados.

También hay que tener cuidado en la interacción entre el avance y la velocidad de corte de la herramienta (velocidad a la que gira la fresa) ya que si se tiene un avance contrario a la velocidad de corte se tiene una entrada más suave del diente de la fresa pero que tiende a arrastrar la pieza o incluso levantarla; en cambio si se tiene un avance en el sentido de la velocidad de corte el acabado es mejor.

Al mismo tiempo, un avance muy pequeño combinado con una velocidad de corte muy alta puede provocar que la madera se caliente mucho o incluso se queme, además de representar un gasto energético innecesario. Si se pone una velocidad de corte adecuada, un avance pequeño únicamente es perjudicial en el tiempo de mecanizado pues se tardará más en efectuar el proceso de arranque de viruta. Si el avance es pequeño además la máquina gana mucho en precisión, permitiendo alcanzar límites de tolerancias más bajos.

Como se puede ver el avance es un parámetro esencial y vital en este tipo de procesos de mecanizado y se ha demostrado que, en caso de hacer depende ese avance de un husillo, va directamente ligado con el paso del mismo. Por esa razón a la hora de escoger el husillo se intentará buscar el mínimo paso posible, por su relación directa con el acabado y la precisión.

Los husillos pueden hacerse con diferentes tipos de roscas según el perfil del filete, el número de filetes o el paso de la rosca; en resumen, de su aplicación. Los tipos de rosca que se pueden encontrar es redonda rectificada, muy utilizada en máquinas de tipo CNC y en el movimiento de mesas de trabajo, cuadrada para piezas más bien pequeñas o trapezoidal para aplicaciones que trabajan con grandes cargas. Debido a que se prevé que la máquina a diseñar no será muy pesada (la original consultada por la empresa pesaba 50 kg, mucho más de lo que se espera de esta), el tipo de rosca más adecuada será la primera, la redonda rectificada, justificada también por su amplia aplicación en el sector.

Consultando la disponibilidad de husillos de este tipo, se ha descubierto que el menor paso que se podía pedir a los proveedores es de 5 mm/vuelta. Realizando nuevamente un estudio de resistencia, reflejado también en el Anexo 3, se ha visto que un diámetro adecuado para este tipo de husillo es el de 16mm.

Con esto ya tenemos suficiente para poder elaborar una estructura base sólida y capaz de aguantar los esfuerzos requeridos en la operación de la máquina. Quedan pues fijados como perfiles estructurales los perfiles hepco de 40x40 mm y como medio de transmisión de par y medio de avance, los husillos de diámetro 16mm, paso 5mm y rosca redonda rectificada.

4.2. Eje Y

El eje Y, que será el movimiento longitudinal, con el recorrido más largo de la máquina, se sitúa en el plano horizontal, teniendo por propósito permitir el movimiento a lo largo de todo el cuerpo o de todo el mástil de la guitarra. Dadas las dimensiones operativas necesarias en esta máquina, este eje tiene que asegurar al menos 1000 mm de recorrido para poder cubrir toda la superficie de la pieza a mecanizar. Cuanto más largo es un eje más fácil es que no esté perfectamente alineado. Una pequeña desviación en su alineación puede provocar un mal funcionamiento de la máquina o incluso imposibilitar físicamente su avance. A la hora de hacer el diseño conceptual por ordenador de este eje, garantizar una correcta alineación es fácil pues los programas de diseño permiten medir exactamente la posición de un elemento y en caso de ser errónea es fácil corregirla. A la hora de construir la máquina habrá que ser mucho más cuidadoso con este apartado pues un error de medición o cálculo puede tener consecuencias mucho más graves y puede comprometer el funcionamiento y la integridad de todo el conjunto.

A partir de una estructura base rectangular, hay que hallar la forma de introducir un primer eje de movimiento longitudinal integrado en la estructura con un movimiento cómodo y sencillo.

El sistema que parecía más cómodo y fácil de implementar era el de colocar una estructura que se deslizara por dentro de la forma base. Es una estrategia muy comúnmente utilizada para este tipo de aplicaciones y se resuelve mediante la inserción de guías para orientar el movimiento de la parte móvil. Los perfiles escogidos son perfectos para este tipo de movimiento ya que gracias a las ranuras que tiene se pueden colocar guías integradas que marquen el recorrido a efectuar. Cuando surgió esta idea apareció la necesidad de buscar este tipo de guías, que se pueden encontrar ofertadas por el mismo fabricante de perfiles.

En la incorporación de guías lo habitual es que la guía quede fijada a la parte fija para que la parte móvil se pueda mover a lo largo de ella. En este caso, para reducir costes usando guías largas, se halló la posibilidad de implementar unas guías pequeñas (de 80 mm de largo), más baratas y que garantizan un buen deslizamiento. Al ser pequeñas, lo más conveniente sería fijar estas guías a la parte móvil de la estructura para que pueda irse deslizando por la ranura de la parte fija.

La pieza elegida para esto se llama multi-slider, una pieza proporcionada por la empresa *Rexroth* del grupo *Bosch* [7]. Además de estar formada por dos lados distintos: uno deslizante en la parte móvil y otro más rugoso para la parte fija. Esta guía usa dos piezas auxiliares que permiten amarrarla a la parte fija: la pieza B es una rosca que se puede integrar en el perfil al que irá fijada la guía y la pieza A es un tornillo sin cabeza para apretar la rosca y asegurar que no se mueve.

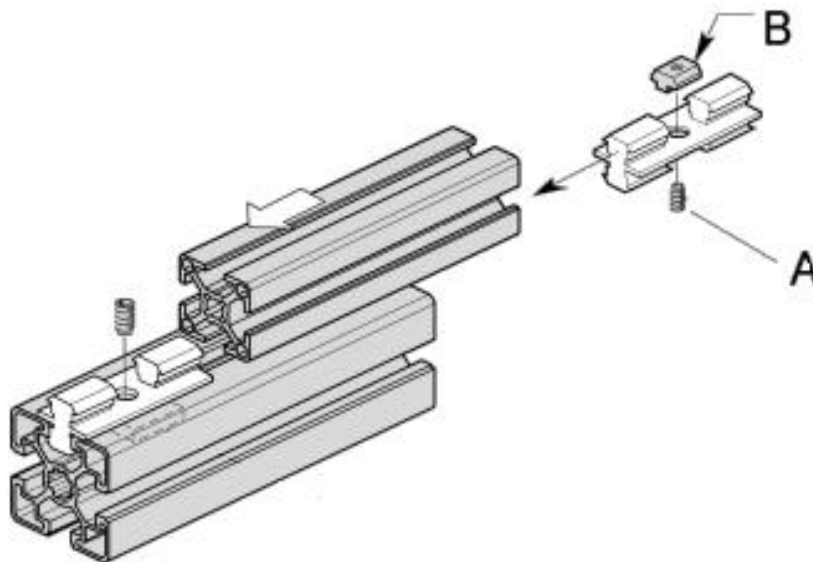


Figura 4.1. Representación del Multi-Slider de Bosch Rexroth

Una posibilidad entonces sería colocar dos pequeñas barras de perfil hepco 40x40 mm en la parte interior de los laterales con guías de este tipo a ambos lados de la estructura base.

Una vez listo el sistema de guiado se puede pasar al sistema que moverá la estructura por esas guías. Para eso hay que recurrir a los sistemas de transmisión de movimiento comentados anteriormente en el análisis de alternativas. La estructura estará movida por un sistema motorizado usando un husillo. La mejor forma de hacer que este husillo haga moverse las dos barras guiadas es uniéndolas entre ellas mediante otra barra con el perfil hepco y hacer que el husillo atravesase y arrastre esta barra central.

Por el tamaño de la estructura aparece la pregunta de si un único husillo bastaría para moverla y sobre todo si lo haría correctamente. En las dos partes guiadas hay una distancia de unos 730 mm y un husillo pasando a través de una barra de ese tamaño, si el husillo no está perfectamente en el medio de la barra o si hay el más mínimo juego en el encaje de piezas, que podría hacer vibrar ligeramente esa barra y torcerla, haciendo que un extremo avance más que el otro, cosa que llevaría al bloqueo del eje, la posible rotura de piezas y un pésimo funcionamiento.

Ya que toda la parte de ensamblaje de piezas será hecha manualmente por el estudiante, es más que probable que pueda presentarse este tipo de situación. Para evitar este problema lo más seguro es colocar dos husillos, de forma simétrica respecto al medio de la barra central, lo suficientemente cerca de los extremos para que no haya desviación posible. Esto muestra la necesidad de usar dos motores para guiar este eje, dos motores que tendrán que estar en perfecta coordinación para garantizar el correcto movimiento de los husillos, que se traducirá en un mismo avance. Este punto es muy importante y será un punto vital a la hora de diseñar la parte de control de la máquina para poner en funcionamiento el control numérico.

Hay que tener en cuenta que este eje deberá mover toda la estructura móvil encargada de desplazar la herramienta, ya que los otros dos ejes irán montados sobre este, así que si el funcionamiento de este eje es incorrecto, ninguno de los otros podrá trabajar correctamente tampoco. Eso implica asegurar que los motores tengan suficiente fuerza para mover todo el conjunto en condiciones normales de funcionamiento durante un cierto tiempo de trabajo.



Figura 4.2. Representación de la fijación de la tuerca a la barra central

Debido a la precisión que requieren las dimensiones para un correcto encaje de las piezas, es probable que esta barra central no sea de las dimensiones exactas, contando la tolerancia en las piezas y en las guías. Para ello se ha decidido incorporar una pieza auxiliar que contribuya a asegurar la perpendicularidad de la barra central con respecto a las piezas guiadas y que garantice una buena fijación aunque las medidas no sean del todo exactas (en caso de que la barra central sea ligeramente más corta de lo necesario) provista por *Bosch Rexroth* llamada T-connector.

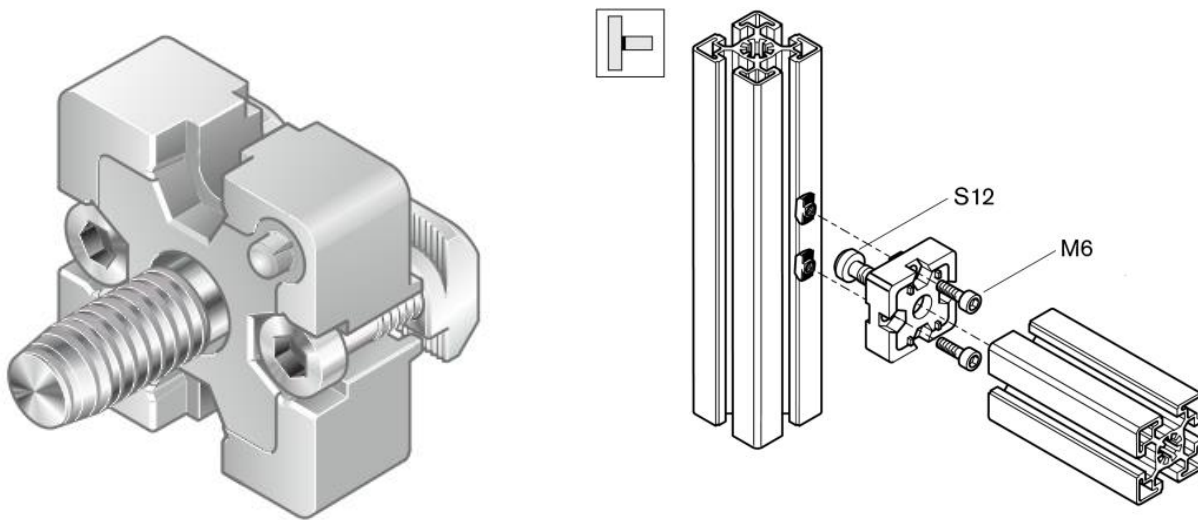


Figura 4.3. Representación del T-connector de Bosch Rexroth

Al fijar esta pieza a ambos lados del perfil central se permite que haya una pequeña separación entre la barra y las piezas laterales igual al recorrido de los dos tornillos laterales del T-connector. Incorporando esta modificación el diseño final obtenido es el siguiente.

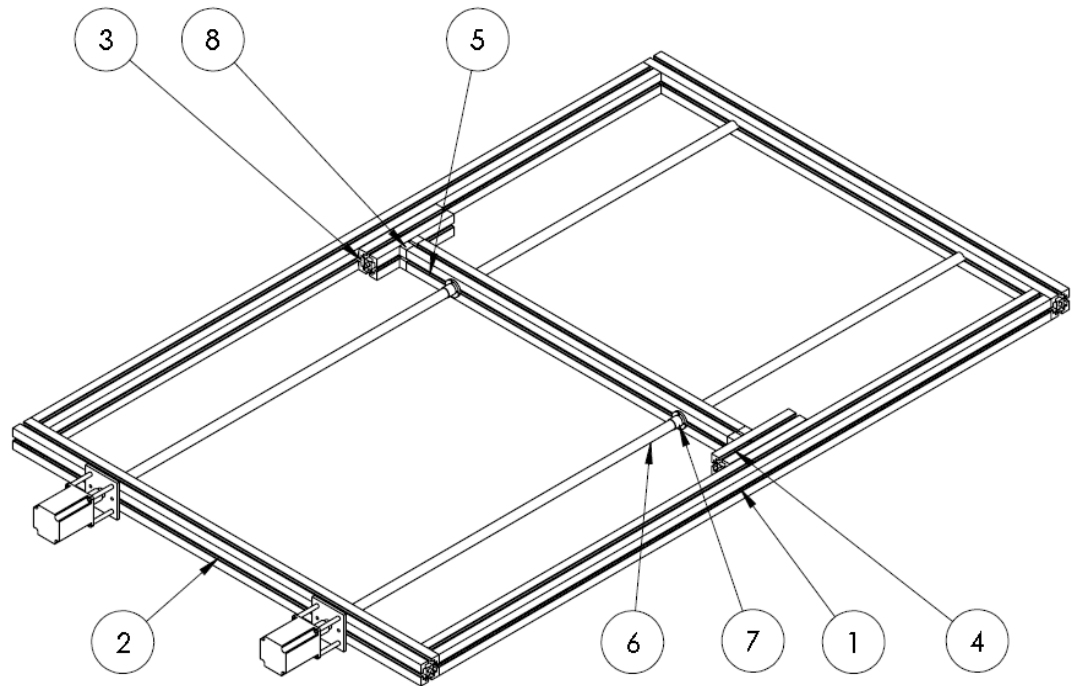


Figura 4.4. Representación del eje Y y piezas que lo componen

Pieza	Nombre	Tamaño (mm)	Cantidad
1	Base Largo	1350	2
2	Base Ancho	900	2
3	Multi-slider	80	4
4	Deslizamiento Y	170	2
5	Barra central	700	5
6	Husillo Y	1450	2
7	Arrastre Y		2
8	T-connector	40x40	2

Tabla 4.1. Elementos que componen el eje Y

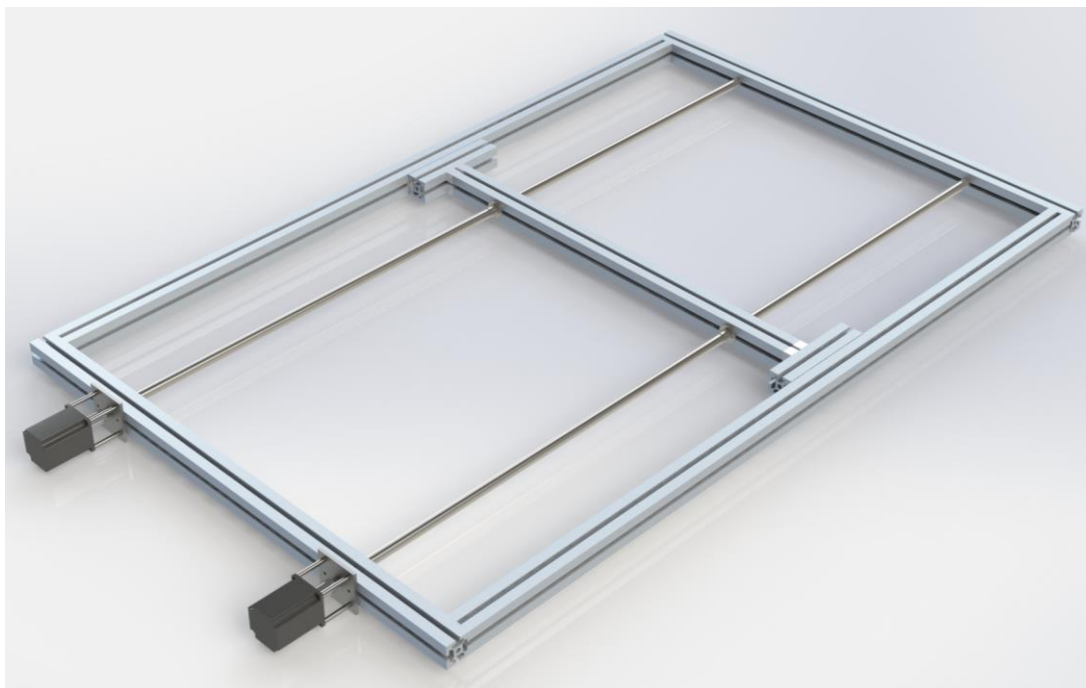


Figura 4.5. Representación en SolidWorks del eje Y final

4.3. Eje X

Una vez colocado el eje Y, hay que pensar en el otro movimiento en el plano horizontal, el eje transversal X. Por la configuración y el diseño de la base y el eje anterior, la ubicación y el funcionamiento de este eje tendrán que estar a una altura diferente. Este eje volverá a estar conducido por un husillo que arrastrará la parte móvil hacia un lado u otro según como gire. Este eje debe permitir el movimiento a lo largo de toda la anchura de la máquina, garantizando un recorrido mínimo de 600 mm para poder abarcar toda la anchura de una guitarra eléctrica. La estructura base ya se ha hecho de una anchura mayor para garantizar que en su interior se podrían alcanzar tales distancias.

Para su diseño se volverá a recurrir a la solución empleada para el eje longitudinal, mediante el uso del mismo tipo de perfiles hepco 40x40 mm y aprovechando sus ranuras para colocar guías de tipo multi-slider. Nuevamente estas guías serán fijadas a la parte móvil para que pueda deslizarse por el perfil largo, que es fijo en la dirección estudiada. En este caso lo que se va a querer mover es una plataforma vertical que servirá de apoyo para la incorporación del último eje, que aguantará la fresadora.

En este caso se usarán también dos barras guiadas para llevar el movimiento al bloque móvil. Estas barras estarán unidas por una placa metálica fijada a estas barras mediante unos tornillos atornillados a unas roscas que encajan en la ranura del perfil.

Esta placa a su vez será atornillada a una tuerca que la arrastrará al hacer girar el husillo, haciendo posible el movimiento del conjunto. Al haber poca distancia entre ambas piezas guiadas basta con un único husillo colocado en posición horizontal.

La estructura de este eje irá enmarcada por dos largas barras horizontales que serán las que sirvan de guía e irán atornilladas a la estructura obtenida al acabar el apartado anterior. Es importante que la placa no vibre con el movimiento del husillo, pues eso haría vibrar el eje restante y por consiguiente el cabezal de la máquina. Una vez más es esencial comprobar que los ajustes y posiciones son correctos para hacer posible el movimiento.

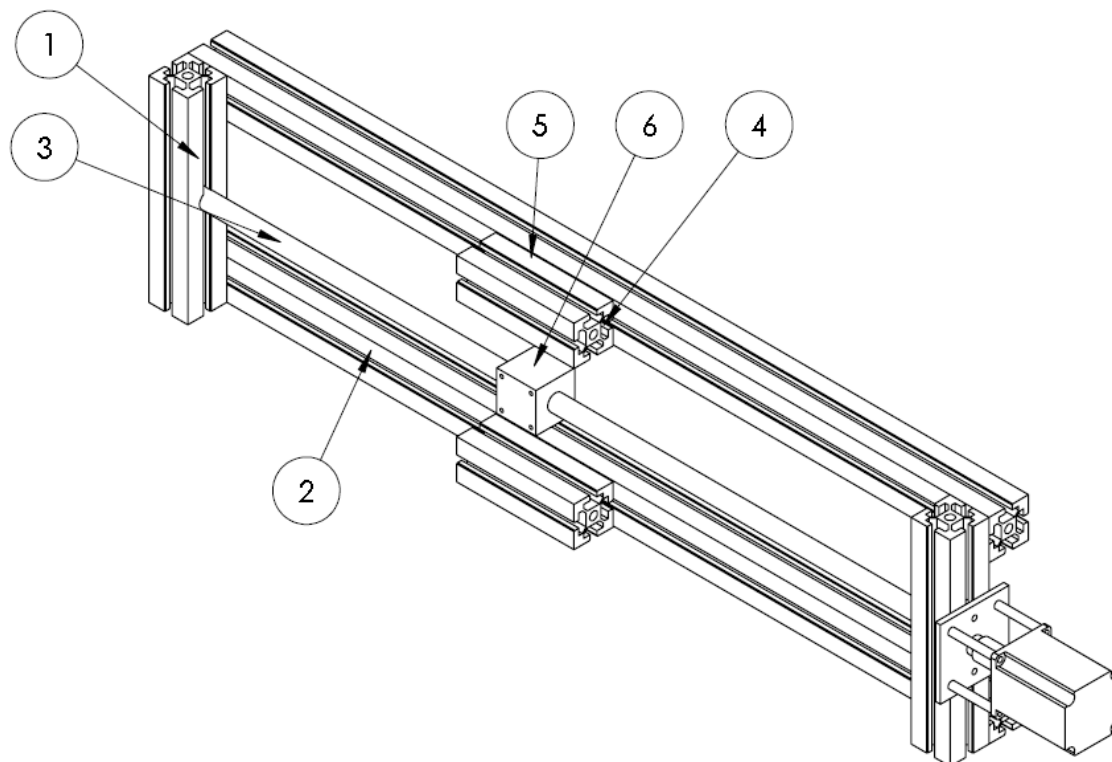


Figura 4.6. Representación del eje X y piezas que lo componen

Pieza	Nombre	Tamaño (mm)	Cantidad
1	Soporte X	200	2
2	Perfil Guía X	820	2
3	Husillo X	850	1
4	Multi-slider	80	5
5	Deslizamiento X	120	2
6	Arrastre X		1

Tabla 4.2. Elementos que componen el eje X



Figura 4.7. Representación en SolidWorks del eje X final

4.4. Eje Z

Ya para acabar con el diseño de los ejes llega el eje vertical Z, este eje será el responsable de mover el cabezal hacia arriba y hacia abajo. El principio de funcionamiento de este eje es muy similar a los anteriores pero a nivel de piezas se ha hecho de forma distinta.

La finalidad de este eje, aparte de transmitir movimiento en la dirección correspondiente, es la de sujetar la fresa, la herramienta que acabará haciendo todo el trabajo de corte y mecanizado en contacto con la madera. Por esa razón hay que asegurarse que la herramienta esté bien sujeta a la estructura de la máquina para que pueda trabajar correctamente. Nuevamente se tiene que recorrer a un sistema de guiado para poder mover la fresa verticalmente. El modelo de fresa usado permitía incluir en su pedido un soporte de aluminio donde encajar firmemente la fresa. Se quiere usar este soporte, que lleva ya de serie unos agujeros roscados en la parte posterior para poder fijarlos a una estructura. Esto se puede aprovechar para colocar una placa metálica a la que fijar el soporte, y que sea esta placa la que se mueva por las guías. Debido a que el espacio es más reducido que en los otros ejes, en este caso se ha optado por perfiles más pequeños (30x30 mm) fijados a la placa movida por eje X, para incorporar en sus ranuras el sistema de guiado.

Para este caso, al no estar creando una zona de deslizamiento entre dos piezas con perfil sino entre un perfil hepcó y una placa plana, se tiene que recurrir a otro tipo de guías. Se requiere una guía con un lado adaptado a este tipo de perfil y otro compatible con una cara plana. Para esto la empresa *Bosch Rexroth* tiene también una pieza que parece adecuada para esta aplicación.

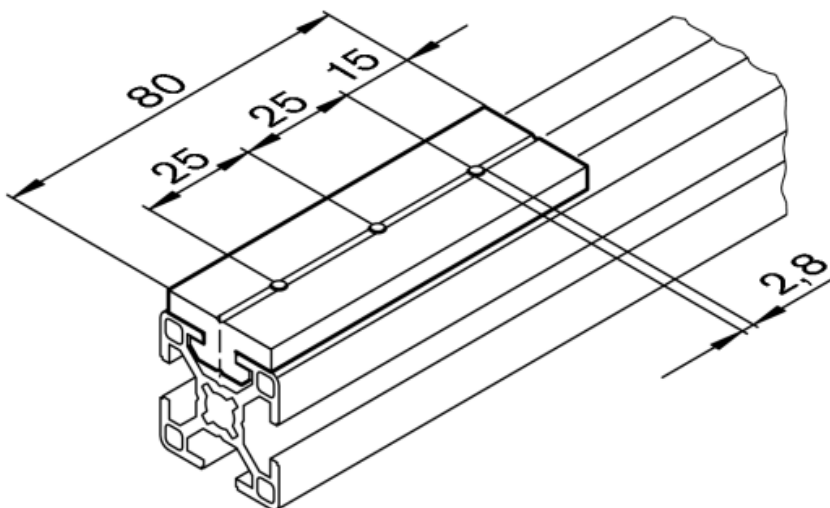


Figura 4.8. Representación de la Guía plana de Bosch Rexroth

La placa se puede atornillar a las guías para asegurar un movimiento recto y limpio.

Para la colocación del husillo, en este caso hay que buscar un nuevo sistema ya que no se cuenta con la presencia de ninguna pieza de soporte. Para ello se recurre a la instalación de una nueva placa, fijada a la parte móvil superior del eje transversal mediante unas tuercas adaptadas para encajar en la ranura de estas barras. Esta placa será la que haga de soporte para el motor del eje Z y la colocación del husillo. Al estar únicamente fijado en su parte superior, para garantizar un correcto movimiento del husillo y evitar que gire de forma excéntrica, se decide instalar otra placa en la base del eje vertical con un agujero para encajar el husillo. Esta placa impedirá que el husillo se desvíe de la dirección vertical durante su funcionamiento. Mediante un cojinete fijado a esta placa inferior, para garantizar un buen giro y evitar el desgaste de las piezas cercanas por roce con el husillo.

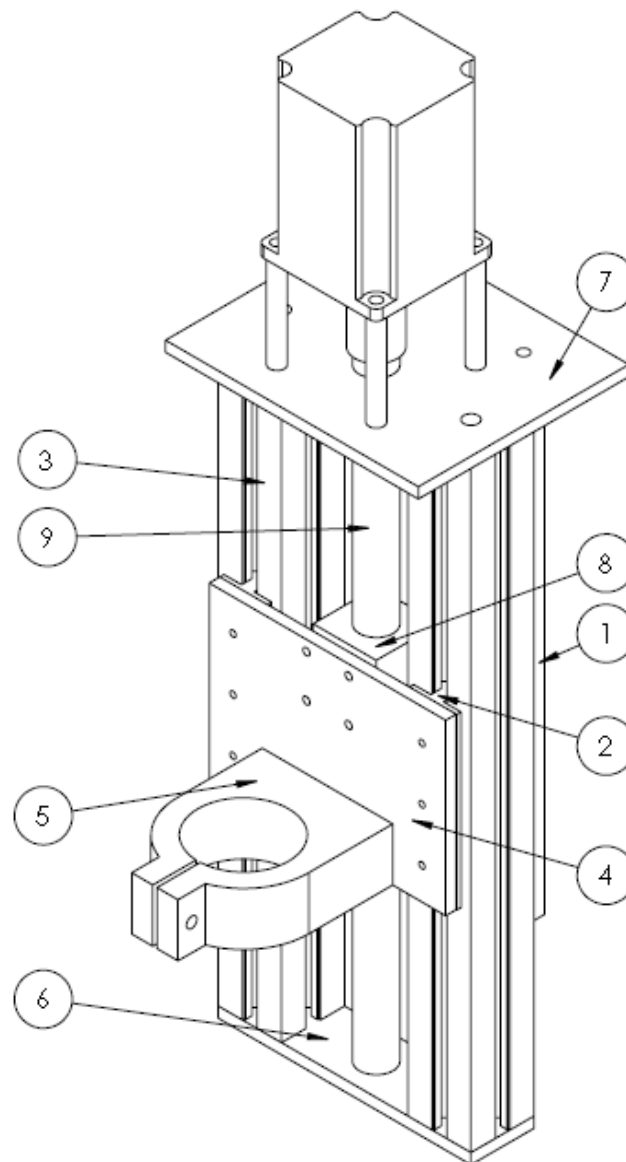


Figura 4.9. Representación del eje Z y piezas que lo componen

Pieza	Nombre	Tamaño (mm)	Cantidad
1	Placa X (acero)	200x120	1
2	Guía Plana	80	2
3	Perfil 30x30	300	2
4	Placa Z	80x112	1
5	Soporte fresadora		1
6	Placa inferior Z (acero)	30x120	1
7	Soporte motor Z (acero)	100x120	1
8	Arrastre Z		1
9	Husillo Z	320	1

Tabla 4.3. Elementos que componen el eje Z

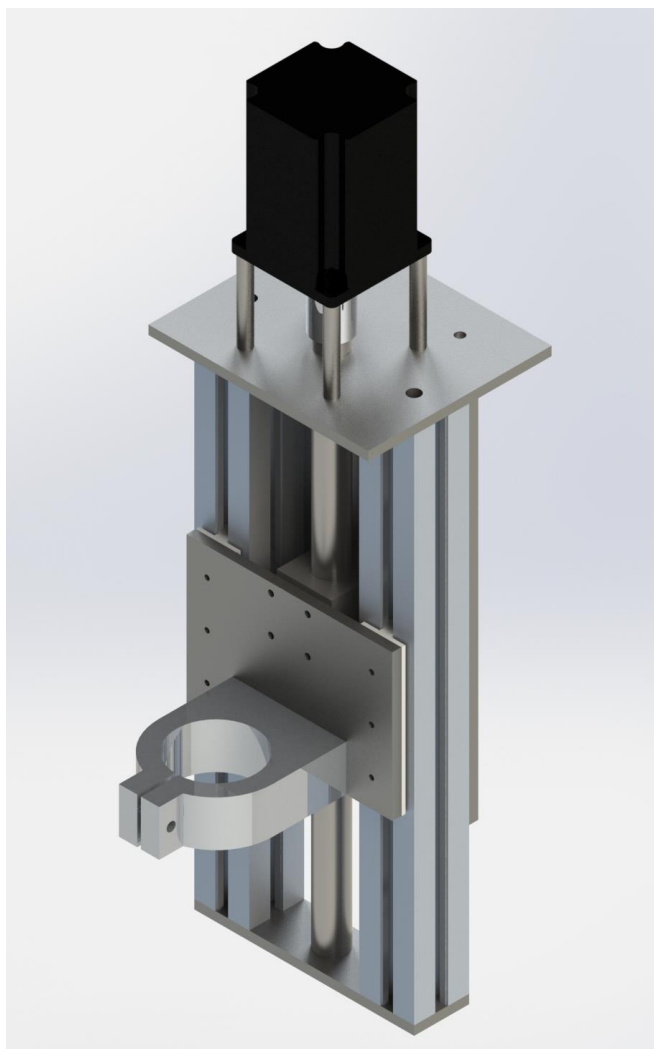


Figura 4.10. Representación en SolidWorks del eje Z final

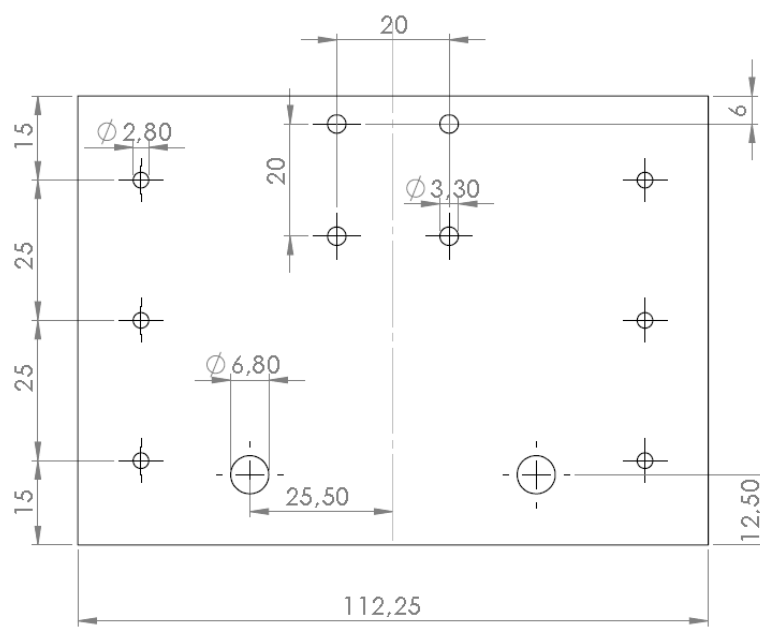


Figura 4.11. Plano en SolidWorks de la Placa Z

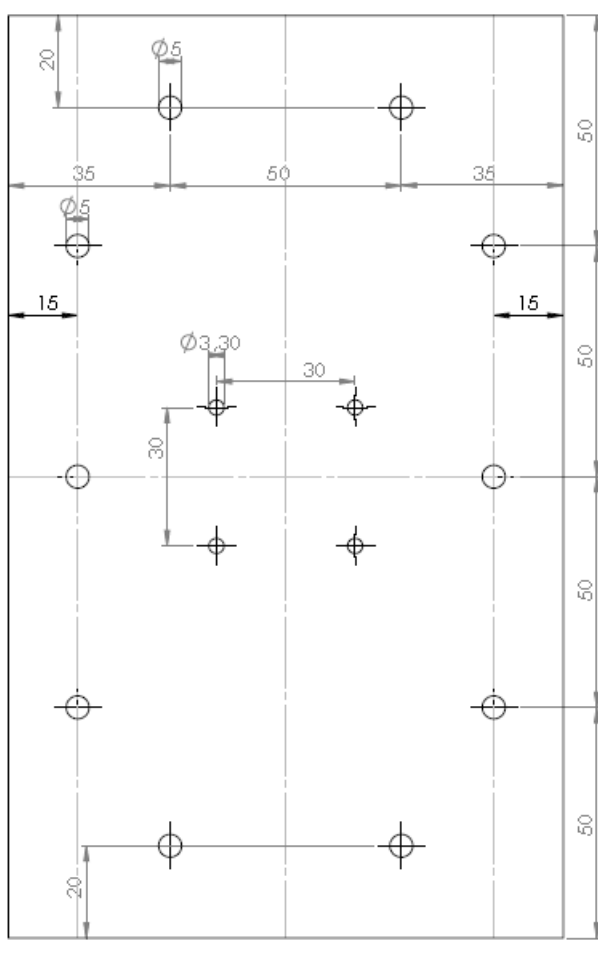


Figura 4.12. Plano en SolidWorks de la Placa X

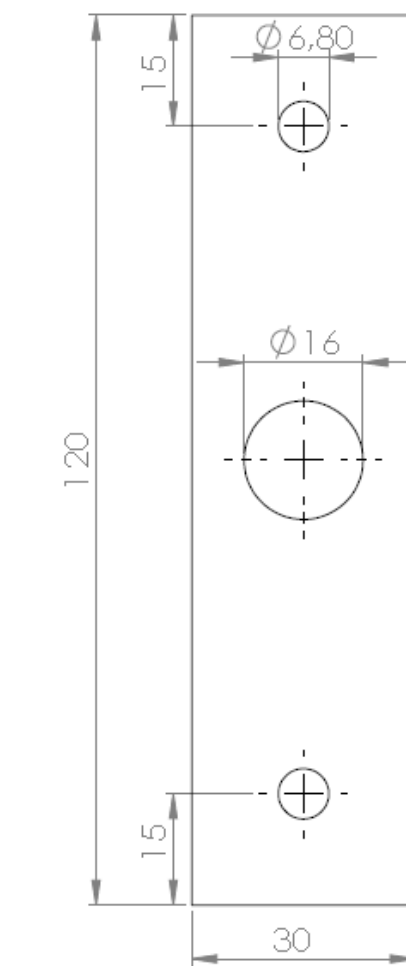


Figura 4.13. Plano en SolidWorks de la Placa inferior Z

4.5. Motores

El motor es el responsable de hacer que la máquina pueda moverse en sus diferentes ejes, encargado de transmitir el par a los husillos. Ya se ha dicho que el tipo de motor que se usará es el motor paso a paso, que es ideal para combinar con el sistema de control a elaborar.

Lo primero a hacer es escoger un motor con un par suficiente para mover a una velocidad adecuada el conjunto de la máquina. Para facilitar su sistema de control se ha decidido usar 4 motores del mismo tipo. En el Anexo 4 se puede ver el estudio realizado para decidir el tipo de motor escogido. Por los resultados obtenidos en el análisis y por la ya disponibilidad de uno de ellos, se ha decidido que el motor que se emplearía será el motor Stepper Nema 23.

El motor Nema 23 es un motor que va girando de $1,8^\circ$ en $1,8^\circ$, lo que hace que tiene que hacer 200 pasos para llegar a dar una vuelta de 360° . Con el sistema de control adecuado, es posible controlar perfectamente una vuelta del motor en permitiendo un control mucho más preciso del avance de la máquina, ya que el avance de los husillos quedaría dividido por 16 o 32 por cada paso que da el motor, pudiendo pararlo en cualquiera de esas posiciones con total precisión. Teniendo en cuenta el paso del husillo (5mm/vuelta) y esta posibilidad de dividir por 200 ese paso por vuelta se puede llegar a obtener una precisión de 0,025 mm, que se puede mejorar todavía más gracias al sistema de control instalado.

Una vez decidido el tipo de motor, es necesario pensar en cómo integrarlo en la estructura de la máquina. Para poder transmitir el par del motor a los husillos va a ser necesario el uso de un acoplamiento entre ambos, un dispositivo que haga de intermediario y transmita la fuerza del motor al eje. Para que este motor tenga un soporte, se ha pensado en crear un sistema para atornillar el motor a una placa de acero, fuera de la máquina, con un agujero que permita pasar el husillo a hacer girar para su acoplamiento. Para que el acoplamiento pueda hacerse correctamente y sin interferir con la geometría de la máquina, se propone un sistema de fijación del motor a la placa mediante unos tornillos largos.

Estas placas tienen que poder ser fijadas luego al resto de la estructura para que todo el conjunto aguante unido, por lo que es necesario añadir agujeros que permitan esta unión.

Las placas a diseñar para los ejes X e Y son idénticas pero la del motor del eje Z es más compleja debido a la diferencia en su sistema de fijación.

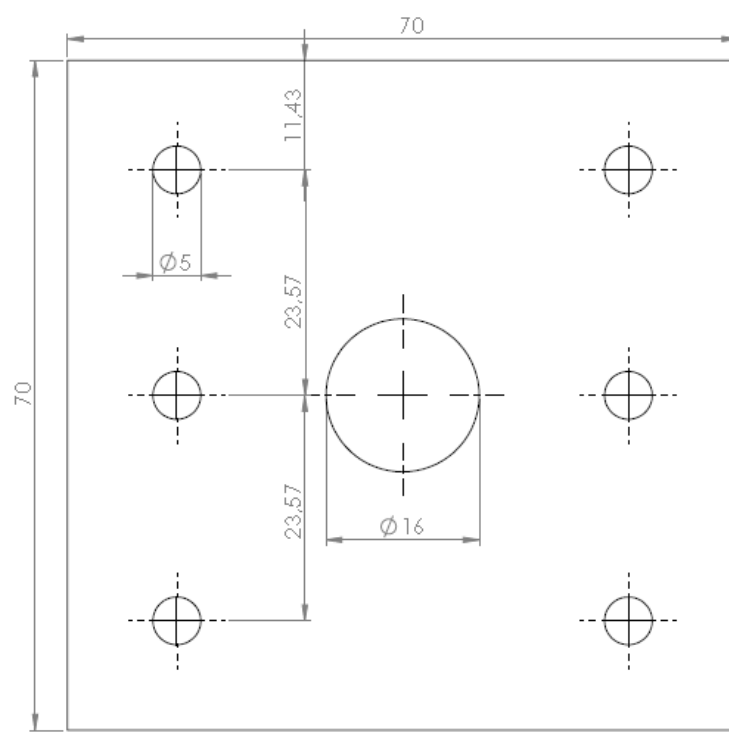


Figura 4.14. Plano en SolidWorks de la Placa motor para ejes X e Y

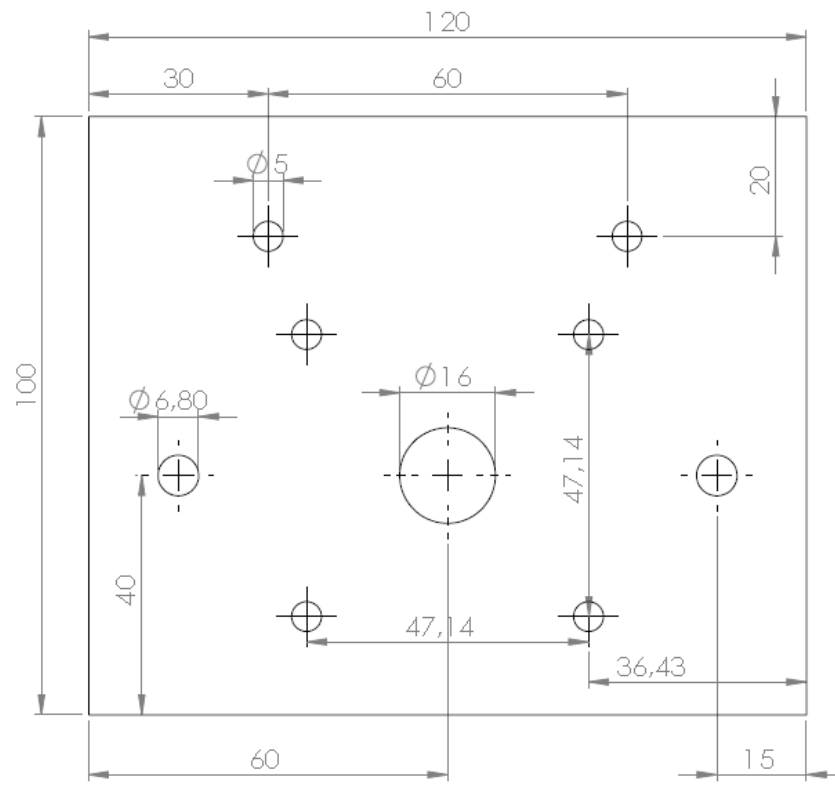


Figura 4.15. Plano en SolidWorks del Soporte motor para eje Z

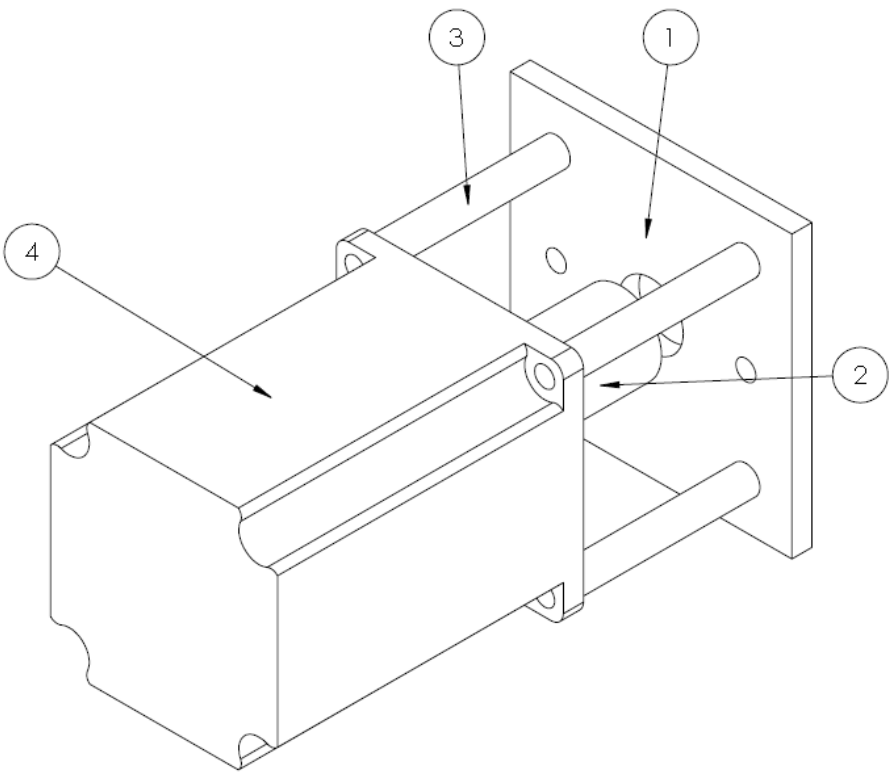


Figura 4.16. Representación del sistema motor y sus partes

Pieza	Nombre	Tamaño (mm)	Cantidad
1	Placa motor (acero)	70x70	1
2	Acoplamiento eje-motor		1
3	Tornillo motor M6	45	4
4	Stepper motor nema 23		1

Tabla 4.4. Elementos que componen sistema motor

4.6. Diseño final

Una vez descrito e ilustrado el funcionamiento y diseño de los diferentes ejes de movimiento de la fresadora CNC hay que pensar en su ensamblaje para lograr crear una máquina que los incorpore todos de la forma más cómoda y eficaz posible.

Los ejes vertical Z y transversal X son los más sencillos de juntar. Para ello se ha usado una placa metálica (Placa X) que está fijada al conjunto del eje Z. Esta placa tenía que fijarse simplemente a la parte móvil del eje X y así ya se podría mover el conjunto. Para ello se requieren simplemente de unos tornillos y unas tuercas. Existen un tipo de tuercas especiales adaptadas al tipo de perfil que se está empleando, las llamadas T-nuts. Por la forma que tienen que se pueden colocar dentro de la ranura de la barra y luego atornillarse a otro objeto gracias al agujero roscado del que dispone, que acaba uniendo barra y pieza. Éste es el método que se ha empleado para unir ambos ejes de movimiento, tanto en la parte superior como la inferior de la parte móvil del eje X (Deslizamiento X).

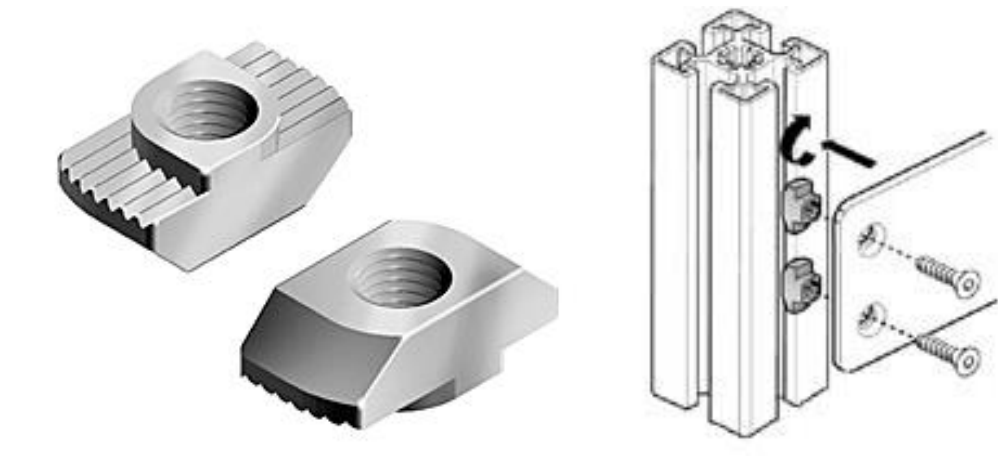


Figura 4.17. Representación del sistema motor y sus partes

Una vez juntados los ejes X y Z, hay que conseguir fijar el conjunto al sistema encargado de definir el movimiento en el eje longitudinal Y. Para poder juntar los ejes X e Y hay que tener cuidado con permitir un correcto funcionamiento del tercer eje, Z. Eso implica asegurar que el recorrido eje vertical no interfiera en la geometría y disposición del eje longitudinal. Para ello se decide añadir una nueva pieza al conjunto, una barra vertical situada en perpendicular sobre las barras que marcan el movimiento en dirección longitudinal (Desplazamiento Y). Esta barra vertical se atornillará al conjunto del eje X en ambos lados, garantizando una correcta sujeción.

Al generar estas uniones se puede hallar un posible problema: que la barra vertical se tuerza o se incline por el peso de los dos otros ejes situados en su parte superior, sobre todo debido al de la fresadora. Para reforzar y asegurar esta verticalidad se ha recurrido al uso de dos tipos de piezas. En primer lugar unas piezas ya empleadas anteriormente en el eje Y, los T-connector, que unirán la parte móvil del eje Y (Deslizamiento X) con la barra vertical, asegurando que las piezas estén perfectamente perpendiculares al momento de fijarlas. Para reforzar todavía más esta unión se usa una nueva pieza, unas esquinas o “racket” que ofrece el fabricante para mejorar este tipo de uniones posiblemente conflictivas. Esta pieza de aluminio permite la unión mediante el uso de tornillos y T-nuts de perfiles perpendiculares entre ellos.

Para concluir con la fase de ensamblaje, se tiene que mencionar el ensamblaje de los motores con cada uno de sus ejes. Para los dos motores del eje Y y el motor del eje X la metodología empleada ha sido la misma: se ha aprovechado la placa a la cual va fijado el motor (Placa motor) para hacer dos agujeros más que permitirán fijar la placa a la barra del perfil correspondiente mediante el uso de tornillos y piezas de tipo T-nut. Debido al bajo peso del motor este tipo de unión es suficiente para garantizar una buena sujeción. El motor del eje Z se une a su husillo mediante una placa (Soporte motor Z) con un diseño distinto ya que no cuenta con el mismo tipo de elementos cercanos. En este caso se ha optado por atornillar directamente la placa a los extremos superiores de las barras de perfil 30x30 mm y nuevamente mediante el uso de tornillos y T-nuts (3 de cada en este caso) fijarla en su extremo a la parte superior de la parte móvil del eje X (la barra Deslizamiento X superior). Esto confiere una fijación segura para todos los motores permitiendo que trabajen lo mejor posible.

Todos estos encajes, uniones y ensamblajes permiten llegar finalmente a un diseño integral final de la fresadora de control numérico, el diseño que será empleado para efectuar los pedidos de piezas y usado como manual de instrucciones y fuente de referencia para la construcción posterior del dispositivo. El diseño final de la máquina tiene unas dimensiones totales de 1550 x 990 x 500 mm (incluyendo motores), ligeramente mayor, excepto por la altura, que el modelo estudiado por la empresa con unos recorridos de 1200 x 620 x 200 mm en los ejes longitudinal, transversal y vertical respectivamente y un peso global de unos 32 kg, mucho más ligera que los 51 kg de la máquina de referencia.

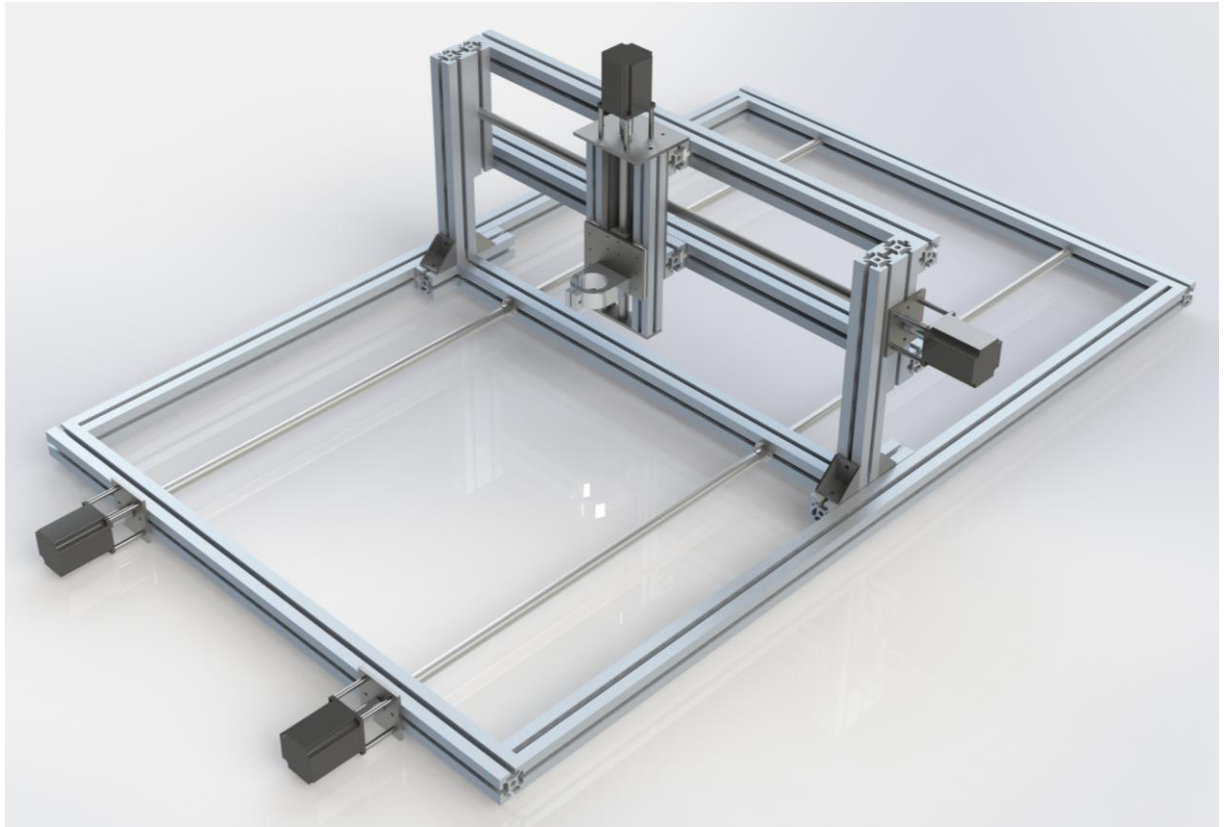


Figura 4.18. Representación en SolidWorks del diseño final de la fresadora CNC

Con esto se acaba la parte de diseño mecánico de la máquina, al que únicamente faltaría añadir los tornillos, unas patas y la mesa (no se ha incluido en la figura anterior para permitir una buena visibilidad del conjunto). La mesa que se usará será de madera, fijada a los extremos de las barras que marcan la anchura de la estructura base mediante nuevamente el uso de tornillos y T-nuts, teniendo en cuenta que se pondrá un pequeño taco debajo de la mesa en esos puntos para evitar que la barra central del eje Y roce con ella mientras esté en funcionamiento.

Para acabar hay que añadir que en el extremo opuesto a la posición del motor, se colocará un cojinete para cada husillo para facilitar un giro correcto, centrado y suave, sin engancharse ni rozar a los perfiles empleados.

5. Programación

Este trabajo estaba sobre todo enfocado hacia el diseño y la construcción de la fresadora de control numérico. Sin embargo, debido a que la máquina a construir tiene que acabar siendo funcional, la parte de programación no se puede eludir. Para el diseño integral de la máquina, la incorporación de ejes y el sistema de transmisión de movimiento escogido era vital tener en cuenta que en un futuro estas acciones tendrían que ser controladas por algún dispositivo.

Como se ha comentado en puntos previos del trabajo, el sistema de control escogido es mediante el uso de un dispositivo *Arduino*, cuyos pines de entrada y salida tendrán que ser configurados para enviar las informaciones pertinentes a los motores para un correcto funcionamiento, una velocidad de avance adecuada, controlar los sensores de final de carrera o permitir una parada de emergencia.

Para toda la parte de programación es necesario tener en cuenta todos los dispositivos que van a intervenir en el sistema de control a diseñar. El dispositivo *Arduino* es una herramienta potente a nivel de diseño de aplicaciones y se encuentran miles de aplicaciones personales o profesionales de este dispositivo, incluidas máquinas de este tipo. Un claro ejemplo de la capacidad de una placa *Arduino* es su uso en las impresoras 3D que diseñan y emplean en la *Fundació CIM*. El dispositivo instalado en esas máquinas permite tanto controlar los 4 motores que componen la máquina como el extrusor, la velocidad de extrusión, la temperatura de extrusión, la temperatura de la “cama caliente”, 3 ventiladores y además incluye el control de una herramienta visual, una pantalla LCD, para la interacción del usuario con la máquina. Esta pantalla permite ver todas las características de la máquina, modificarlas e incluso mover los ejes independientemente a voluntad. Todas estas acciones las permite un único dispositivo hardware *Arduino*.

El dispositivo *Arduino* será configurado con un programa capaz de gestionar el funcionamiento de todos los motores. La idea para su elaboración es partir de un programa ya creado con acceso abierto, libre y gratuito para el público. Se ha pensado que, aprovechando que se conoce su funcionamiento gracias al taller al que se ha asistido, se podría coger por ejemplo el programa usado por la *Fundació CIM* para programar las impresoras *RepRapBCN* y adaptarlo a una fresadora CNC. La *RepRap BCN3D+* presenta la ventaja de tener ya cuatro motores, dos de los cuales funcionan de forma idéntica para controlar el movimiento vertical. Se podría aprovechar ese código eliminando toda la parte de código referente al cabezal extrusor de la impresora 3D, cambiando los ejes a los que van referenciados cada motor y todas las partes que hacen referencia al recorrido de los ejes, paso de los husillos, número de pasos de los motores, etc.

La corriente de salida de las patas de un dispositivo *Arduino* es muy baja para poder provocar el movimiento del motor, para ello se coloca un dispositivo amplificador de corriente, como el chip A4988 que, gracias al uso de un potenciómetro, permite variar la corriente de salida dentro de un cierto rango, permitiendo al motor funcionar. Ya que estos dispositivos trabajan con corrientes altos, es probable que los chips se calienten, así que para evitarlo sería adecuado colocar un ventilador encima que los vaya refrigerando.

Tal y como se ha mencionado al hablar del dispositivo *Arduino* se necesita emplear unos sensores de final de carrera, unos aparatos electrónicos que actúan como interruptores mecánicos (también existen de tipo electroneumático o eléctrico) indicando si una parte móvil ha llegado a no a una posición determinada, que en este tipo de aplicación correspondería a una posición límite. Podrían instalarse dos finales de carrera en cada eje de movimiento, uno marcando el inicio y otro el final pero mediante simples cálculos mecánicos, se puede incluir en el código cuántas vueltas tiene que dar el motor hasta que la parte móvil pase desde el final de carrera hasta el otro extremo, ahorrando pues la necesidad de instalar la mitad de los sensores. Estos sensores de final de carrera actúan como sistema de referencia para el control numérico de la máquina, permitiendo saber en todo momento dónde está la herramienta en función del número de movimientos hechos por cada motor con respecto a su posición inicial en el final de carrera.

En caso de problema con la máquina es imprescindible que exista un sistema capaz de detenerla inmediatamente para prevenir accidentes del tipo que sean. Para eso es vital poder contar con un botón de parada de emergencia, un dispositivo cuya instalación es obligatoria en todo el mundo de las máquinas industriales ya que es una pieza clave en todo lo referente a la seguridad, tanto del usuario como de la máquina y sus componentes.

A estos dispositivos hay que añadir todo el sistema de cableado que permita pasar toda la información y las instrucciones entre el *Arduino* y los otros periféricos. Para que todo este sistema funcione, es imprescindible usar una fuente de alimentación capaz de hacer funcionar todo el conjunto. El dispositivo *Arduino* necesita voltajes de entrada de entre 6 y 12V para funcionar correctamente. Para ello se necesita adquirir una fuente de alimentación de 12V.

Una vez instalado y programado todo el sistema electrónico, la máquina ya está lista para trabajar, ahora únicamente necesita recibir el modelo de pieza de construir en formato de código G (código propio de los sistemas de control numérico), que es el que puede procesar y seguir la máquina. El problema está cuando se quiere pasar de un diseño 2D o 3D en formato CAD de una pieza hecha por ordenador a un listado de instrucciones en código G que se mandarán al *Arduino* que permitan obtener dicha pieza. Para esta conversión existen varios programas, libres o gratuitos, como por ejemplo CAM (Computer Aided Machining).

6. Estudio económico

6.1. Inversión inicial

Una vez se tiene el diseño integral de la máquina a construir y la lista de material necesario para su construcción se puede proceder al pedido de todos estos componentes y piezas que acabarán dando forma a la fresadora de control numérico. A continuación se expone una lista de piezas a pedir con su correspondiente cantidad y precio, separando la parte mecánica de la electrónica para la obtención de un presupuesto aproximado del coste que representará la construcción de una máquina de estas características.

Descripción	Cantidad	Tamaño (mm)	Precio/unidad	Precio (€)
Fresadora + Soporte	1		134,00	134,00
Base Largo	2	1350	27,66	55,32
Base Ancho	2	900	20,76	41,52
Perfil Guía X	2	820	20,76	41,52
Deslizamiento X	2	120	11,10	22,20
Deslizamiento Y	2	170	11,10	22,20
Barra central	1	700	19,38	19,38
Barra vertical	2	320	13,86	27,72
Soporte X	2	200	11,10	22,20
Perfil 30x30	2	300	10,50	21,00
Esquina	10	40x40	3,83	38,30
T-connector	4	40x40	6,87	27,48
T-nut M6 groove 10/8	15		1,72	25,80
Multi-slider	8		3,29	26,32
Tornillo DIN 914 M8	8	20	0,08	0,66
Sliding block M8 groove 10	8		2,83	22,64
Guía plana	2		2,83	5,66
Husillo D16mm	2	1450	82,94	165,88
Husillo D16mm	1	820	46,90	46,90
Husillo D16mm	1	300	17,16	17,16
Arrastre Y	2		5,00	10,00
Arrastre X	1		5,00	5,00
Arrastre Z	1		5,00	5,00
Soporte motor Z	1	120x110x5	1,04	1,04
Placa X	1	200x120x5	1,88	1,88
Placa Z	1	80x120x5	0,75	0,75
Placa inferior Z	1	30x120x5	0,28	0,28

Placa motor	3	70x70x5	0,38	1,15
Tornillo DIN 912 M12	4	50	0,46	1,83
Arandela M12	4		0,04	0,17
Tornillo DIN 912 M10	4	120	0,73	2,92
Arandela M10	4		0,02	0,10
Tuerca M10	4		0,05	0,22
Tornillo DIN 912 M6	15	10	0,07	1,08
Arandela M6	15		0,01	0,11
Acoplamiento motor	4		3,50	14,00
Cojinetes	4	D16	9,30	37,20

Tabla 6.1. Coste de elementos estructurales y mecánicos de la máquina

A todos estos sistemas mecánicos se podría añadir algún posible tornillo, pero ya visto el coste unitario de este tipo de piezas, queda claro que su impacto sobre el precio final es poco relevante. Tras analizar la parte mecánica, llega el turno de la parte electrónica.

Descripción	Cantidad	Precio/unidad	Precio
Stepper motor nema 23	4	54,40	217,60
Arduino Mega	1	52,00	52,00
Chips A4988 Pololu	4	6,00	24,00
Fuente de alimentación 12V	1	37,95	37,95
Finales de carrera	3	8,10	24,30
Ventilador	1	3,50	3,50
Pulsador de emergencia	1	10,00	10,00
Software de control	1	Gratuito	Gratuito

Tabla 6.2. Coste de elementos de la electrónica y control de la máquina

Ambas tablas, unidas en un único presupuesto permiten obtener la inversión total estimada a efectuar.

Total (€)	1235,95
21% IVA (€)	259,55
Total + IVA (€)	1495,50

Tabla 6.3. Coste total de la máquina

Estos números son una indicación aproximada del presupuesto total esperado para la construcción de la fresadora CNC. Como se puede observar, el precio final está situado justo en el límite de los 1500 € orientativos fijados inicialmente por la empresa, lo que permite obtener su aprobación del diseño y hace posible la elaboración de esta máquina desde el punto de vista de la empresa.

En esto hay que tener en cuenta que la empresa ya disponía de algunos de estos elementos como un motor nema 23, la fresadora y su soporte y la posibilidad de conseguir una fuente de alimentación de forma gratuita, todas ellas piezas de coste elevado respecto al conjunto, por lo que la inversión real que se tendría que hacer es menor.

6.2. Estudio de viabilidad

Tras ver la inversión inicial que supone fabricar esta fresadora CNC, es interesante para la empresa evaluar la rentabilidad de su inversión. Para ello se recurre a estudios económicos para calcular el VAN, el TIR y el Payback o periodo de retorno.

Las guitarras eléctricas fabricadas por la empresa *Beyond MyLeisure* tienen un coste aproximado de unos 3500 € y requieren aproximadamente tres o cuatro semanas de trabajo cada una desde su fase de diseño hasta su construcción final. La elaboración de cada una de ellas supone un gasto de 600-700€ de media, según el tipo y cantidad de madera empleada para su fabricación, cantidad de trabajo de mecanizado necesario, mantenimiento de la página web,.... La existencia de esta máquina podría permitir reducir entre un 5 y un 10% la cantidad de horas de trabajo necesarias y el tiempo en que se requiere de un usuario efectuando los trabajos de mecanizado ya que la fresadora de control numérico trabajaría sola tras su puesta a punto y recibir las instrucciones necesarias. Estudiando el peor caso, en que la máquina ahorre un 5% de tiempo de trabajo y de tiempo de usuario, se puede decir de forma aproximada que la fresadora de control numérico supondría una ganancia del 5% del beneficio por guitarra.

El director de la empresa trabaja como autónomo y a día de hoy es el encargado de absolutamente todo en la empresa ya que trabaja solo. Esto hace que todos los ingresos que generen sus actividades son para él para repartirlos como le parezca correcto, sin tener que pagar un salario a otros empleados.

Anualmente, contando periodos de vacaciones, periodos de tiempo dedicados a innovación de máquinas, puestas a punto, actualizaciones en diseños de utensilios y encuentros con clientes, se calcula que se pueden hacer entre 9 y 10 guitarras. A continuación se hará un estudio económico contando que únicamente se venden 4 guitarras al año ya que la situación económica actual hace que la demanda en este mercado se haya reducido mucho.

Concepto	Cantidad	Precio unitario (€)	Precio total (€)
Gastos materiales + mecanizado	10	650,00	6500,00
Ingresos	4	3 500,00	14 000,00
Beneficios	-	-	7 500,00
Ganancia con fresadora CNC	-	-	375,00

Tabla 6.4. Tabla de gastos, ingresos y beneficios

La adquisición de una fresadora de control numérico por computadora supondría una ganancia anual de unos 375 € con el modelo empleado.

Para el cálculo del VAN y el TIR se contemplarán horizontes de 5 años, aunque se espera que la fresadora tenga una vida útil más larga (con posibles recambios necesarios en algunas piezas).

El cálculo del VAN se efectuará con una tasa de interés del 3%, muy razonable en el panorama económico actual.

$$\begin{aligned}
 VAN &= -Inversión\ inicial + \sum_{i=1}^5 \frac{Flujo\ tesorería\ del\ periodo}{(1 + 0.03)^i} = & (Ec. 6.1) \\
 &= -1.495,50 + \sum_{i=1}^5 \frac{375,00}{(1 + 0.03)^i} = 223,39\ €
 \end{aligned}$$

TIR:

$$0 = -Inversión\ inicial + \sum_{i=1}^5 \frac{Flujo\ tesorería\ del\ periodo}{(1 + TIR)^i} \rightarrow TIR = 8,04\% \quad (Ec. 6.2)$$

Periodo	0	1	2	3	4	5
Inversión	-1495,50					
Gastos materiales + mecanizado		6500,00	6500,00	6500,00	6500,00	6500,00
Ingresos		14000,00	14000,00	14000,00	14000,00	14000,00
Beneficios		7500,00	7500,00	7500,00	7500,00	7500,00
Ahorro por fresadora CNC (5%)		375,00	375,00	375,00	375,00	375,00
Flujo de caja		375,00	375,00	375,00	375,00	375,00
Total	-1495,50	-1120,50	-745,50	-370,50	4,50	379,50

Tabla 6.4. Cálculo del periodo de retorno

El valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) son positivos, indicando que se recuperaría la inversión inicial al cabo de ese horizonte de 5 años. El periodo de retorno se situaría a los 4 años después de realizar la inversión. En este cálculo no se ha tenido en cuenta la comodidad que aporta ni que el tiempo que ahorra el uso de esta máquina, tiempo que podría ser empleado en otras actividades provechosas o en tener más tiempo disponible para la construcción de nuevas guitarras. La situación económica actual y la situación de la empresa (es una empresa muy reciente y por lo tanto poco conocida a día de hoy) hace que se hayan considerado números bajos a nivel de cantidad de productos vendidos pero en los próximos 5 años las cosas podrían cambiar mucho y evolucionar hacia resultados mejores si se consigue llevar a cabo una correcta campaña de marketing y difundir la información de forma adecuada.

7. Construcción

Efectuados los pedidos ya solamente queda esperar a que empiecen a llegar los materiales para poder empezar finalmente con el montaje de la máquina diseñada. A fechas de la entrega de esta memoria las únicas piezas que han sido ya recibidas son el conjunto de barras de perfil hepco que conforman la estructura principal de la máquina, recibidas una semana antes del plazo de entrega. Tanto los husillos como los motores todavía están por llegar por lo que no será posible su instalación en la máquina todavía.

Debido a problemas relacionados con falta de material auxiliar y la dificultad para coincidir a nivel de horarios con *Beyond MyLeisure* para poder acudir a su taller, situado en El Vendrell, ciudad de la provincia de Tarragona, únicamente se ha podido trabajar en el proyecto durante dos tardes. Estas dos tardes fueron empleadas en la verificación de que todo el material era correcto, que las medidas, cantidades y características de las piezas eran las solicitadas y en procesos de taladrado de algunas de esas piezas, haciendo imposible avanzar realmente en la máquina. Por esta razón en este apartado del trabajo no se podrá mostrar ninguna imagen del montaje de la máquina aunque se espera y prevé tener la posibilidad de realizar avances a tiempo para la defensa del trabajo, pudiendo enseñar algunas imágenes de su progreso en ese momento.

Debido a esta falta de material que enseñar, lo que se va a hacer es explicar brevemente cómo se va a montar esta máquina. Cuando se diseña o crea un ensamblaje por ordenador, quitar y poner piezas por doquier es fácil y sin limitaciones debidas a la geometría o presencia de otras piezas que impiden físicamente el poner una pieza. En resumen, a la hora de diseñar una máquina a través de un programa de diseño como *SolidWorks*, el orden en que se efectúe ese montaje no tiene una gran relevancia mientras el conjunto a ensamblar sea coherente. Para dar un ejemplo muy simple, en la realidad no se puede colocar un objeto que se nos ha olvidado dentro de una caja que ha sido tapada y cerrada, en cambio con este programa de diseño no habría ningún problema para hacer que esa pieza esté donde se desee.

La idea principal para efectuar este montaje es la separación de ejes, montándolos todos por separado ya que la forma en que han sido diseñados permite unirlos entre ellos por separado sin problemas.

Antes de estudiar los ejes por separado hay que pensar en la unión de algunos de los perfiles, que por su disposición en la estructura no pueden unirse sin efectuar algún proceso de mecanizado previo de taladrado.

7.1. Mecanizado

Debido a la estructura del diseño, varios de los perfiles hepco han tenido que ser mecanizados para adaptarse a las necesidades requeridas mediante un taladrado de eje vertical. Para efectuar estos agujeros se ha hecho: un cálculo preciso repetido varias veces, una marca con un clavo para marcar bien el lugar a taladrar, un punteado para asegurar que el taladro está colocado en la buena posición para poder fijarlo antes de la siguiente operación y un taladrado de diámetro progresivo sin mover la pieza para garantizar que el agujero se haga donde se quiere. Las barras afectadas por esto han sido:

- Base ancha: en los extremos se tienen que efectuar unos agujeros del métrico 12 para poder atornillarla al extremo de la Base Larga. En total: 4 agujeros de M12.
- Base ancha: en la barra se tienen que efectuar dos agujeros para poder hacer pasar el husillo que mueve el eje Y. En total, otros 4 agujeros de diámetro 16 mm (en la misma cara que los agujeros anteriores)

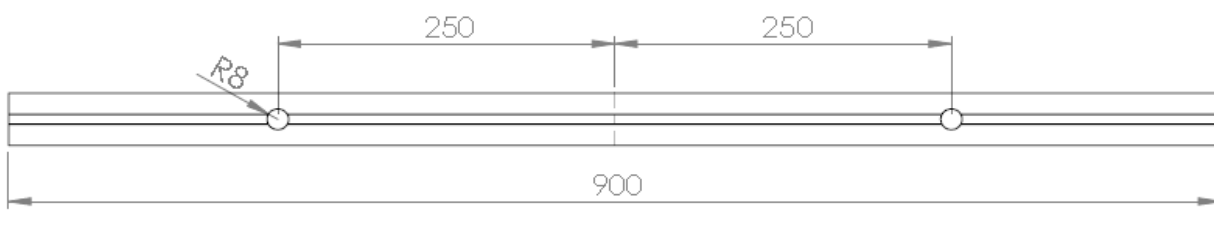


Figura 7.1. Plano en SolidWorks de agujeros para husillo en Base ancha

- Barra central: se tienen que efectuar los mismos dos agujeros que en la Base ancha para que pasen los husillos. Hay que ser muy precisos para que el husillo vaya completamente recto al hacer las uniones.
- Soporte X + Perfil Guía X: en los extremos laterales hay que efectuar unos agujeros que se harán también a las barras Perfil Guía X para poder formar el marco del eje X. En total 8 agujeros de M10 para poder atornillarlas. Estos mismos agujeros tendrán que hacerse en la Barra vertical para poder unir los ejes X e Y posteriormente.
- Soporte X: se tiene que efectuar un agujero a la mitad de su longitud para la inserción del husillo que moverá el eje X. En total 2 agujeros de diámetro 16 mm (en la cara perpendicular a la anterior).



Figura 7.2. Imágenes del proceso de punteado, taladrado y agujero resultante en una barra de perfil hepco.

7.2. Eje Y

Para hacer más inteligible la explicación se vuelven a poner esta figura con su tabla.

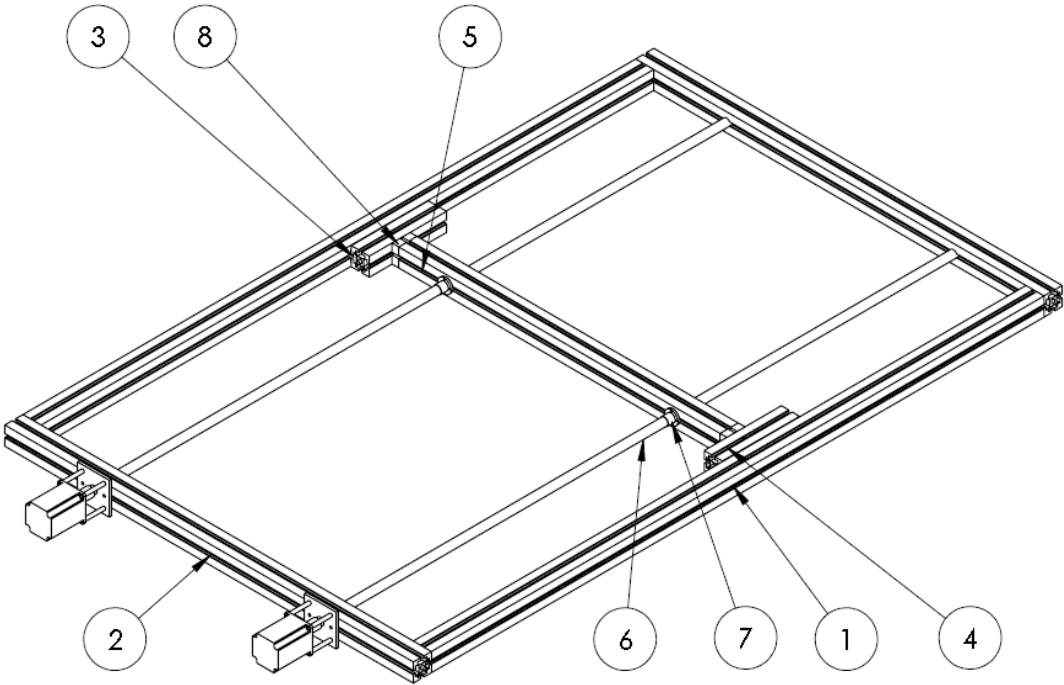


Figura 7.3. Representación del eje Y y piezas que lo componen

Pieza	Nombre	Tamaño (mm)	Cantidad
1	Base Largo	1350	2
2	Base Ancho	900	2
3	Multi-slider	80	4
4	Deslizamiento Y	170	2
5	Barra central	700	5
6	Husillo Y	1450	2
7	Arrastre Y		2
8	T-connector	40x40	2

Tabla 7.1. Elementos que componen el eje Y

Una vez acabados todos estos mecanizados, se podría pasar a la parte de ensamblaje por ejes. Para el eje Y, lo primero que se puede hacer es unir una de las barras Base ancha con las dos Bases largas mediante un tornillo de M12 largo (de 50 o 60 mm de largo), aprovechando los agujeros de M12 que se han hecho ya que los perfiles que se han pedido al proveedor ya están dotados de agujeros roscados de M12 en sus extremos. Para todos los tornillos es importante recordar de colocar una arandela ya que permite repartir la fuerza que ejerce el tornillo por una superficie mayor, evitando estropear la estructura.

Con estas tres barras bien fijadas, a parte se fijan dos multi-slider a cada Deslizamiento Y para luego colocarlas en las ranuras de las Bases Largas. Por otra parte, se fijan los T-connector a los extremos de la Barra central. A continuación se fija la Barra central a las barras Deslizamiento Y, asegurando que está perfectamente perpendicular. Fijar la Barra central a las partes móviles SIN APRETAR y probar si el conjunto se desliza bien por toda la longitud de la guía. Una vez funcione correctamente, se pueden colocar los husillos, pasándolos con cuidado por los agujeros y fijando la tuerca a la Barra central. Una vez hecho este, colocar la barra Base ancho que faltaba, colocando antes 4 piezas T-nut en su ranura frontal que servirán para fijar los motores, y tras volver a probar el sistema antes de apretar todos los tornillos y tuercas.

7.3. Eje X

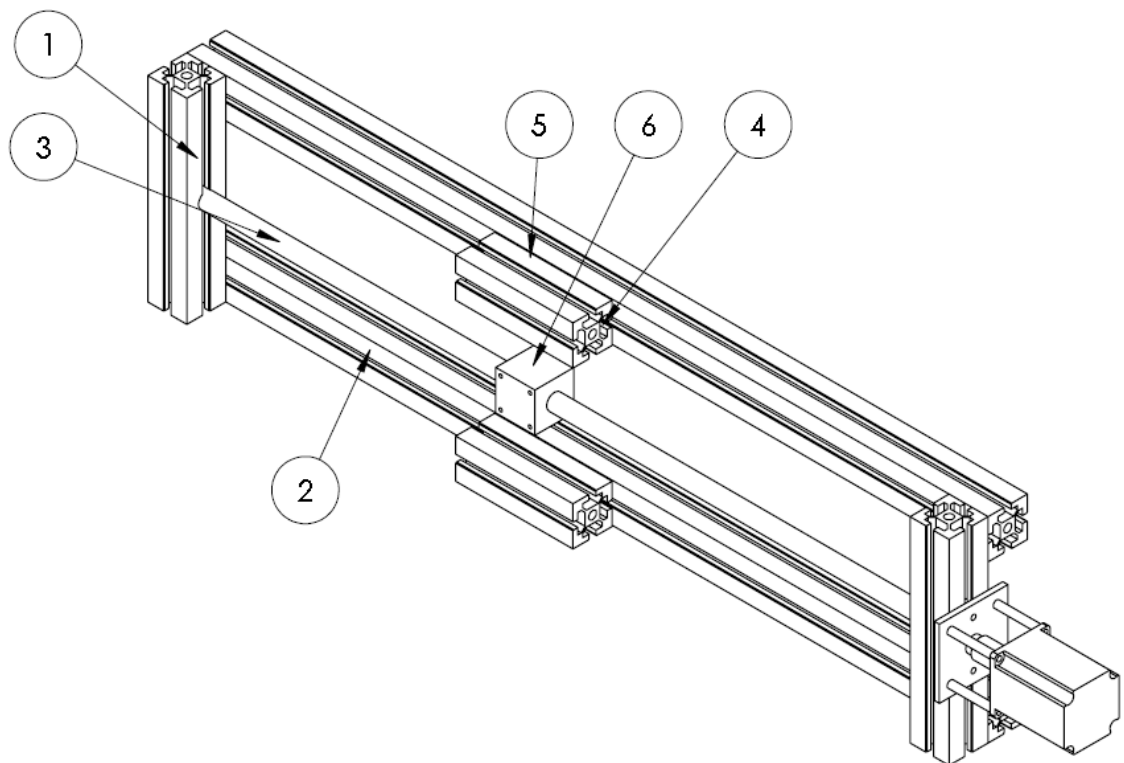


Figura 7.4. Representación del eje X y piezas que lo componen

Pieza	Nombre	Tamaño (mm)	Cantidad
1	Soporte X	200	2
2	Perfil Guía X	820	2
3	Husillo X	850	1
4	Multi-slider	80	5
5	Deslizamiento X	120	2
6	Arrastre X		1

Tabla 7.2. Elementos que componen el eje X

Este eje se monta de forma muy similar al anterior así que no es necesario volver a explicarlo todo de nuevo. Lo único que hay que resaltar y recordar es que en este caso las barras Perfil Guía X y Soporte X van fijadas por un tornillo que las atraviesa a ambas y que hay que colocar dos piezas T-nut en la parte frontal de ambos Deslizamiento X (para luego poder fijar allí la Placa X del eje Z) y dos más en la ranura superior del Deslizamiento X superior donde se fijará la placa Soporte motor del eje Z (con opción de colocar tres T-nuts por seguridad). Ya que por ahora las piezas Deslizamiento X están al descubierto, se recomienda colocar un trozo de celo en los extremos para evitar que caigan las T-nuts. Hay que colocar también dos T-nuts en la ranura que mira hacia el exterior de un Soporte X para poder colocar luego ahí el sistema motor.

7.4. Eje Z

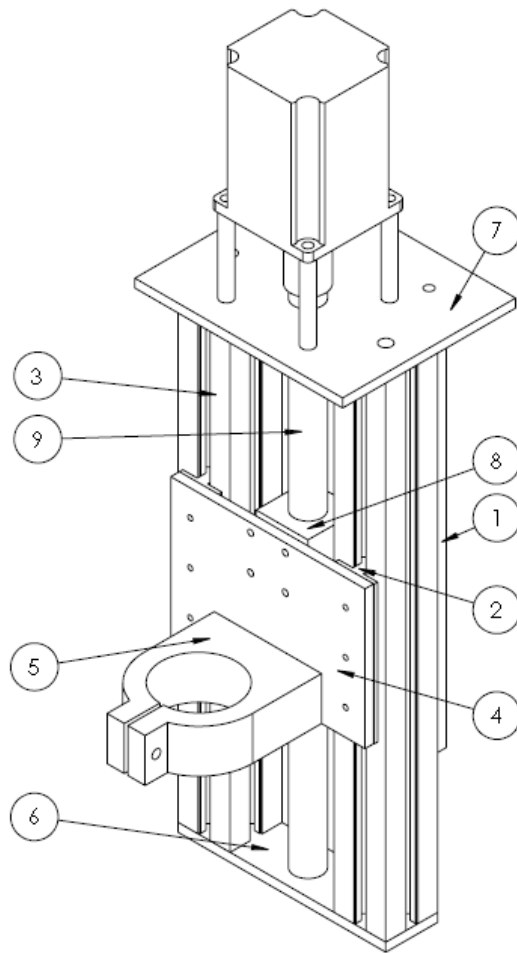


Figura 7.5. Representación del eje Z y piezas que lo componen

Pieza	Nombre	Tamaño (mm)	Cantidad
1	Placa X (acero)	200x120	1
2	Guía Plana	80	2
3	Perfil 30x30	300	2
4	Placa Z	80x112	1
5	Soporte fresadora		1
6	Placa inferior Z (acero)	30x120	1
7	Soporte motor Z (acero)	100x120	1
8	Arrastre Z		1
9	Husillo Z	320	1

Tabla 7.3. Elementos que componen el eje Z

El primer paso a dar en la construcción de este eje es la fijación de la Placa X a los Perfiles 30x30 mediante el uso de tres T-nuts adaptadas a su perfil cada una. Una vez fijadas estas dos barras se atornilla el Soporte motor Z a la parte superior gracias a los agujeros roscados que ya tienen los Perfiles 30x30 en sus extremos. A continuación, a parte, se fijan las Guías planas y el soporte de la fresa a la Placa Z para meterlos juntos en las ranuras de los perfiles y comprobar su correcto deslizamiento. Una vez satisfechos del funcionamiento se coloca la Placa inferior Z para evitar que caiga la parte móvil y ayudar a centrar el husillo.

7.5. Ensamblaje final

Una vez se tienen los tres ejes montados por separado se procederá a su unión. Para empezar se unen los ejes X y Z gracias a las T-nuts colocadas anteriormente en las barras Deslizamiento X, fijándose a la Placa X y al Soporte motor Z. A continuación, para poder unir estos dos ejes al eje Y, hay que instalar antes las Barras verticales sobre los Deslizamientos Y usando los T-connectors previamente fijados a las Barras verticales y asegurar su fijación con las Esquinas 40x40.

Ya se pueden unir los otros dos ejes usando los tornillos que unían los Perfil Guía X a los Soporte X para atravesar también la barra vertical, apretando el conjunto mediante una tuerca.

El sistema motor es un sistema sencillo de tornillos y tuercas que unen el motor con la Placa motor, pudiendo regular la distancia entre ambos para hacerlo coincidir bien con el husillo y el acoplamiento entre eje del motor y husillo. Estos sistemas motor, para los ejes X e Y son fijados a la estructura usando las T-nuts puestas anteriormente, y para el eje Z ya queda integrado en la estructura del eje.

8. Estudio medioambiental

Llegados a este punto del proyecto, ya que el objetivo es llegar a construir de verdad el prototipo de máquina diseñado, es necesario hacer un estudio del impacto medioambiental que su construcción tendrá. Para ello se hará un análisis cualitativo de la máquina y sus componentes.

La fresadora de control numérico diseñada está compuesta esencialmente por piezas de aluminio (perfiles) y acero (placas, husillos, tornillos). La creación de los perfiles hepco o de los husillos suponen un gasto energético importante por la cantidad de procesos de mecanizado y tratamientos superficiales que se requieren para llegar a su obtención. Los dispositivos electrónicos contienen cobre, circuitos impresos, plástico,... y su elaboración también supone un gasto energético importante y una gran precisión.

El montaje de la máquina será hecho a mano, a excepción de los agujeros que se han tenido que hacer para permitir la fijación de piezas. El hecho de que se haga todo el montaje manualmente supone un ahorro a nivel energético. El único gasto energético existente será el del taladrado de los perfiles hepco para insertar tornillos para fijarlos y para hacer pasar los husillos a través.

Durante su vida útil, esta máquina únicamente gasta energía en forma de corriente eléctrica para hacer funcionar la fuente de alimentación que la suministra a toda la circuitería de la fresadora. La fresadora mecanizará madera, con lo que la viruta arrancada podría ser reciclada. La madera es triturada y convertida en tablonos de aglomerado que pueden ser reutilizados para muchas aplicaciones. De vez en cuando sería bueno renovar el aceite en los dispositivos que se mueven a lo largo de los husillos, para garantizar un buen movimiento durante su funcionamiento.

Al final de su vida útil, la máquina puede ser fácilmente desmantelada de nuevo en partes y piezas sueltas, siendo la mayor parte de ellas reciclables. El aluminio es un material reciclable que se funde de nuevo para fabricar nuevas estructuras. Es un proceso mucho más barato y que consume mucha menos energía que otros métodos de fabricación. El acero también es perfectamente reciclable, se desguaza y separando los diferentes componentes se obtiene lo que se llama chatarra. Esta chatarra es compactada en bloques que son mandados de vuelta a acererías que la fundirán para poder elaborar nuevas piezas.

La parte más dañina a nivel medioambiental es la fase de producción de las piezas por separado para la construcción de la máquina aunque durante su vida útil y su retirada se puede compensar con su uso y su reciclaje.

9. Planificación

Para llevar a cabo la elaboración de este proyecto de final de grado en el plazo de tiempo requerido se tiene que hacer una planificación de las actividades a llevar a cabo y fechas límite de cada una de ellas. A la hora de planificar este proyecto a lo largo de este cuatrimestre, se ha visto que se podía dividir el trabajo en tres grandes partes.

Una primera fase de estudio, contextualización, análisis, investigación y de tomar de decisiones sobre todo el asunto de las fresadoras de control numérico por computadora. Para ello hace falta todo un primer análisis acerca del estado del arte de este tipo de sistemas, saber de dónde vienen, qué hacen, para qué se usan y cómo han evolucionado a lo largo de los años. Esto constituiría un marco de contextualización del proyecto. Una vez visto esto es necesario pasar a entender el funcionamiento de estas máquinas, tanto a nivel físico, mecánico, electrónico e informático. A partir de los conceptos y diseños estudiados, es posible pasar a la etapa de estudio y análisis de alternativas para poder decidir cómo orientar y crear un diseño propio. En estos primeros meses se ha dedicado también mucho tiempo al estudio de toda la parte electrónica de la máquina, el sistema de control basado en *Arduino*, como conectarlo, alimentarlo, programarlo y tipos de software disponibles para hacer funcionar la máquina, a pesar de que esta fase de desarrollo del producto esté fuera del alcance de este proyecto.

En segundo lugar, habiendo decidido ya algunos aspectos fundamentales acerca de la máquina a crear, se puede dar un paso al frente y empezar con la fase de diseño de la fresadora CNC. Este diseño se efectuará por partes, separando la estructura, los motores y los tres ejes de movimiento de la máquina. Estos primeros diseños servirán para obtener un diseño provisional de la máquina. Combinando este diseño preliminar con consultas a catálogos de fabricantes y críticas que permitirían mejorarlo, se puede pasar al diseño detallado de la fresadora, empleando piezas y estructuras posibles de encargar posteriormente.

Teniendo acabado este diseño detallado, finalmente se puede pasar a efectuar los pedidos de piezas que se emplearán en la construcción de la máquina. Pedidos de este tipo, pudiendo ser a proveedores extranjeros, pueden tardar varias semanas en llegar por lo que se prevé aprovechar esas semanas para centrarse en la redacción de la memoria del proyecto y comprar el posible material auxiliar necesario para el montaje (tornillos, tuercas,...). Una vez llegados los pedidos se puede pasar a la construcción, pasando antes por el mecanizado necesario que hacer con algunas piezas para adaptarlas a las necesidades, llegando poco a poco a un resultado cada vez más cercano a la máquina final ideada.

La planificación del proyecto se ha efectuado únicamente en el periodo de tiempo que corresponde al cuatrimestre universitario y duración de la parte evaluada del proyecto. El compromiso al que se llegó con la empresa implicada era el de construir una fresadora de control numérico por computadora operativa, dotada pues de una estructura, unos ejes, unos motores y un sistema de control que permitiría hacer funcionar al conjunto para cumplir con el propósito de mecanizar madera. Esto implica pues que no se llegará al final de la elaboración de la máquina hasta su construcción completa, integrando aquellos elementos que todavía no se han podido conseguir y comprobando que todo el conjunto aguanta bien y se puede mover correctamente a lo largo de sus ejes, y se instalen todos los componentes electrónicos.

La parte de electrónica requerirá un cierto trabajo de programación de código para poder adaptar un código similar y compatible a la máquina diseñada. Esto implica revisar la parte de código encargada del control de los motores, teniendo en cuenta que en esta fresadora hay 4 motores, dos de ellos teniendo que funcionar de forma completamente idéntica.

Una vez hecha la parte del programa se tiene que fijar a la estructura de la máquina los componentes electrónicos e instalar todo el sistema de cableado que une la placa central *Arduino* con todos los dispositivos.

Número	Nombre de tarea	10 feb '14	17 feb '14	24 feb '14	3 mar '14	10 mar '14	17 mar '14	24 mar '14	31 mar '14	7 abr '14	14 abr '14	21 abr '14	28 abr '14	5 may '14	12 may '14	19 may '14	26 may '14	2 jun '14	9 jun '14	16 jun '14	23 jun '14	30 jun '14	7 jul '14
1	Estado del arte																						
2	Especificaciones																						
3	Estudio electrónico																						
4	Análisis alternativas																						
5	Estructura																						
6	Motores																						
7	Eje Y																						
8	Evaluación parcial																						
9	Eje X																						
10	Eje Z																						
11	Taller Reprap																						
12	Ensamblaje motor																						
13	Estudio catálogos																						
14	Diseño detallado																						
15	Pedidos																						
16	Documentación																						
17	Montaje																						
18	Mecanizado																						
19	Entrega																						
20	Presentación																						

Conclusiones

Tras un periodo de investigación inicial sobre las bases de las máquinas y sistemas de fresado basados en el control numérico donde aparecían conceptos nuevos, diseños desconocidos o construcciones extrañas, poco a poco se ha empezado a entender el funcionamiento de este mundo.

El estudio de modelos, experimentos llevados a cabo por otros y las ideas propias permitieron poco a poco irse acercando a lo que podría llegar a ser una máquina de control numérico personal. Estos estudios revelaron que había una gran variedad de posibles caminos a seguir para alcanzar la meta marcada. Para el progreso por ese camino se hizo necesario empezar a tomar decisiones importantes que marcarían el futuro de la máquina a diseñar, decisiones como el tipo de material a emplear, el tipo de sistema de guiado, la forma de moverse de la máquina, el tipo de perfiles a usar o el soporte electrónico a instalar para lograr hacer funcionar todo este conjunto.

Estas decisiones marcaron unas pautas y directrices a seguir para el salto a la etapa posterior, el diseño conceptual de la máquina. Para ello, se tuvieron que hacer unos primeros bocetos con la intención de dar ya una forma aproximada de la fresadora CNC para ayudar a su visualización y comprobar si las medidas y piezas puestas eran correctas, suficientes y necesarias. Este diseño fue el paso intermedio que permitió pasar a un modelo basado en el uso de piezas reales consultadas en páginas de distintos proveedores, escogiendo los tipos de perfil y dimensiones necesarios para asegurar la resistencia de la máquina al trabajo a efectuar. Este modelo incorporaría todas estas piezas escogidas para tener un diseño realista y que sirva de referencia para la posterior construcción tras haber comprobado que el presupuesto de fabricar dicho modelo estaba dentro de los límites marcados.

Este proyecto ha sido de gran interés personal debido a su carácter multidisciplinar, abarcando diversos temas y aspectos y permitiendo un gran aprendizaje tanto a nivel conceptual con toda la parte de estudio inicial, reflexión sobre el diseño y su elaboración como a nivel práctico en el contacto con empresas en busca de un proveedor y en la construcción de la máquina. El proyecto ha permitido el aprendizaje del uso de otras máquinas de mecanizado por arranque de viruta para poner a punto las distintas piezas a ensamblar. El contacto directo con personas que viven de este sector y que están familiarizados con el uso de todo este tipo de máquinas e incluso a veces con su diseño como lo fue en el taller de la RepRapBCN3D+ de la *Fundació CIM* fue una gran oportunidad para seguir aprendiendo más sobre este mundo, sus retos, oportunidades, innovaciones, tendencias y proporcionó un sólido apoyo para el desarrollo de este proyecto.

La construcción de un dispositivo totalmente diseñado por uno mismo produce una gran satisfacción personal al ver como poco a poco va cogiendo forma aquello que tan sólo se tenía dibujado en una hoja de papel o guardado en un archivo informático. Con esto se ha podido cumplir uno de los mayores objetivos personales del proyecto que era el de tener la oportunidad de elaborar algo físico, tangible, fruto del trabajo, el esfuerzo y el tiempo invertidos.

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores este trabajo es solamente una parte del trabajo a llevar a cabo para la elaboración de esta herramienta de trabajo. La continuidad del trabajo está asegurada por el contrato y el compromiso de cara a la empresa *Beyond MyLeisure*, teniendo la oportunidad de poder seguir aprendiendo más con la implementación de toda la parte electrónica de la máquina. Tras la instalación de la electrónica se pasará a toda una fase de test en los que se pondrá a prueba el funcionamiento de la máquina en todos sus ejes y su precisión en el avance de los husillos al mandar unas instrucciones básicas hasta tener resultados satisfactorios. Seguidamente se realizarán unas pruebas de precisión de corte y calidad de acabado en régimen operativo de la máquina para comprobar que trabaja correctamente durante las tareas de mecanizado llevadas a cabo.

Con todo esto se tendría que acabar llegando a una máquina totalmente funcional que permitirá acelerar y mejorar la calidad de algunas de las operaciones a las que son sometidas las guitarras eléctricas de la empresa.

El futuro de este proyecto será perseguido con ilusión, ganas y motivación con las ganas de ver cumplido el objetivo de diseñar por completo una máquina con un cierto nivel de complejidad, desde el nacimiento de la idea hasta la puesta a punto y dar vida a una máquina que tenga una utilidad y un propósito claros.

Agradecimientos

La elaboración de este proyecto no habría sido posible sin la intervención de varias personas y entidades que han sido de gran ayuda para el desarrollo del trabajo y fuentes de consejos y críticas a las que acudir en caso de necesidad.

En primer lugar, mi más sincero agradecimiento a la empresa *Beyound MyLeisure S.L.* por brindarme la oportunidad de involucrarme en un proyecto de este tipo, por la confianza, la ayuda, los consejos y los medios proporcionados para que el resultado de este proyecto pueda coger forma y convertirse en una máquina real con un propósito, una finalidad y una vida útil por delante. La estrecha colaboración con la empresa ha permitido un intercambio rápido de impresiones en cuanto al diseño, críticas, posibles mejoras y proveedores que han llevado a la obtención de la máquina actual.

Muchas gracias a la sección *RepRap BCN* de la *Fundació CIM* por permitirme realizar su taller de construcción de la impresora 3D *RepRap BCN 3D+* del 17 al 19 de abril que me ha permitido aprender mucho, coger ideas y consultar a gente con una amplia experiencia en el sector de la máquinas de mecanizado y su programación. Un taller que se volvió muy agradable y de gran interés gracias a la ayuda de unos responsables muy competentes, siempre receptivos y siempre dispuestos a ayudar en cualquier tipo de duda que surgiera, cuyas ideas y sugerencias respecto a este trabajo han sido tenidas muy en cuenta.

Para acabar, un agradecimiento especial al tutor de este proyecto, Joaquim Minguella, por su apoyo, por hacer posible la inscripción al taller de *RepRap BCN*, sus consejos, sus críticas y propuestas para mejorar, su disponibilidad y por dedicar su tiempo en hacer posible el progreso del trabajo y en corregir esta memoria siempre que ha sido necesario a lo largo de todo el proyecto.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] J. VIVANCOS CALVET, J.R. GOMA AYATS, I. BUJ CORRAL, L. COSTA HERRERO. *Sistemas de Fabricación, Barcelona: Setembre 2013*
- [2] CNC-STEP. *High Z S-1000/T*. [http://www.cnc-router-routers.com/html/high-z_t_cnc_router_routing_en.html, Consultada 25/02/2014]
- [3] REXROTH BOSCH GROUP. *Assembly Technology, Basic Mechanic Elements*. [<http://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/assembly-technology/basic-mechanic-elements/index>, Consultada a lo largo de todo el proyecto]
- [4] REP RAPBCN. *RepRapBCN3D+, Workshop, Manuales Diciembre 2013*, Barcelona: 2013
- [5] RASPBERRY PI. *Raspberry Pi*. [<http://www.raspberrypi.org/>, Consultada 17/03/2014]
- [6] ARDUINO. *Arduino Mega 2560*. [<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>, Consultada 17/03/2014]
- [7] REXROTH BOSCH GROUP. *Catálogo de Piezas 2014*

Bibliografía complementaria

NBS EUROBEARINGS. *Sistemas de guiado lineales, 01/07/12*.

SUCARMO S.L.. *CNC Robótica*. [<http://www.cnc-robotica.com/>, Consultada 4/03/2014]

BUILD YOUR CNC, *Electronics and Mechanical Components*. [<https://www.buildyourcnc.com/default.aspx>, Consultada reiteradas veces]

LIRTEX, *Homemade DIY CNC Machine using Step Motors, Dremel, and EMC2*. [<http://www.lirtex.com/robotics/diy-cnc-machine/>, Consultada reiteradas veces]

Anexos

Anexo 1: Taller de construcción RepRapBCN3D+

Debido al contenido que podía llegar a abarcar el trabajo, se consultó al tutor del proyecto acerca de asuntos estructurales y cuestiones sobre la electrónica de la máquina que podrían surgir después de acabar el proyecto. En aquel momento Joaquim Minguella sugirió la idea de participar en un taller organizado por la *RepRapBCN* de la *Fundació CIM* de montar una impresora 3D, pensando que los conocimientos que se podrían adquirir allí serían de gran ayuda para el desarrollo del proyecto. Tras aceptar con gran motivación e ilusión esta propuesta, el tutor consultó con los responsables del taller acerca de la posibilidad de participar, montando una máquina que luego se quedaría la *Fundació CIM* para su uso propio. La petición fue aceptada y del 17 al 19 de abril se pudo llevar a cabo el *Workshop*.

Fue una gran experiencia en la que se pudieron adquirir muchos conocimientos, conocer gente muy interesada y con experiencia en este sector, tanto los responsables del taller como algunos de los participantes, puesto que algunos venían de empresas que trabajaban en éste ámbito. Rodeados por un personal asistente muy competente, activo, siempre dispuesto a ayudar, con ganas de compartir conocimientos que iban más allá de un simple taller de montaje y siempre de buen humor.

El primer día y medio de taller estaba centrado en la parte estructural de la máquina para tenerla físicamente a punto para su funcionamiento. El siguiente medio día y una pequeña parte del tercero estaban enfocados a la instalación de toda la electrónica, el cableado y las conexiones para que la máquina ya esté totalmente preparada para su funcionamiento. El tiempo restante del tercer día se dedicó al aprendizaje del uso de los softwares y programas usados para convertir diseños 3D en códigos que puedan ser interpretados por el sistema de control de la máquina. A continuación se ponen algunas imágenes del workshop y la evolución de la máquina.

Nuevamente se quiere dar las gracias a la *Fundació CIM* por haber hecho posible la realización de este taller que ha sido de gran interés y ha permitido y permitirá avanzar en la elaboración de la máquina tanto a nivel estructural como electrónico y de programación.

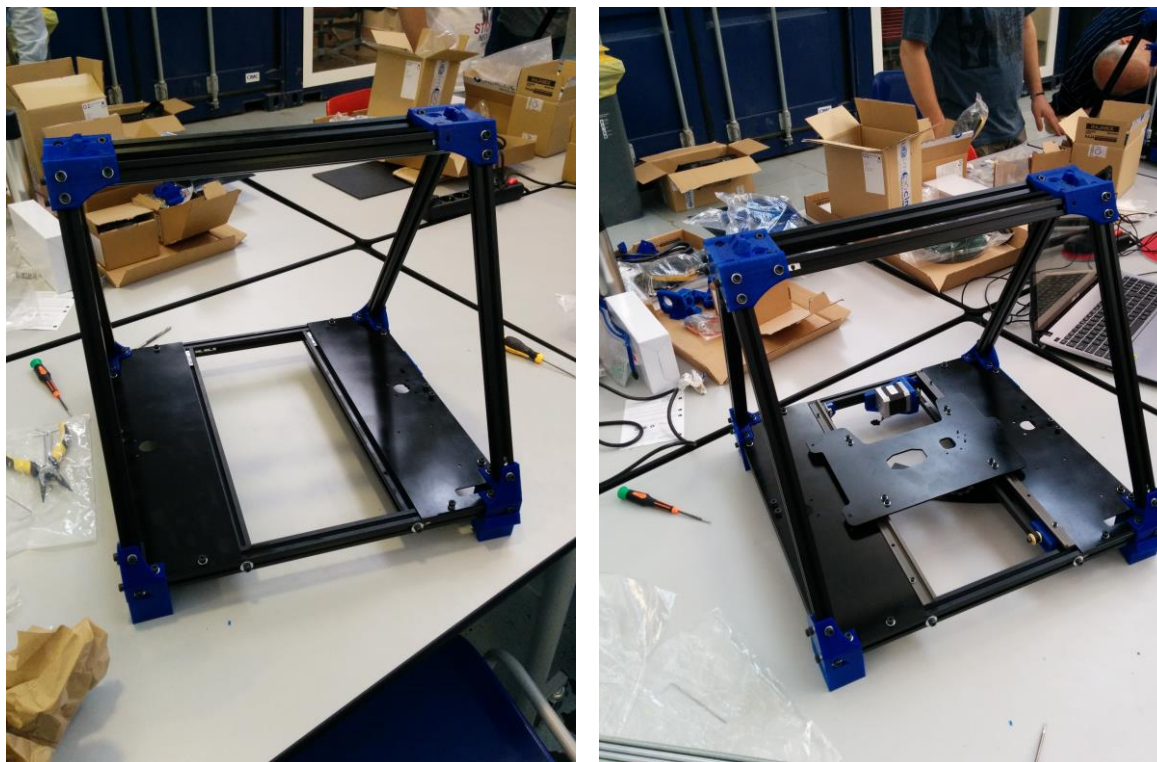


Figura 13.1. Izquierda: Estructura base de la RepRapBCN3D+. Derecha: Incorporación del eje longitudinal

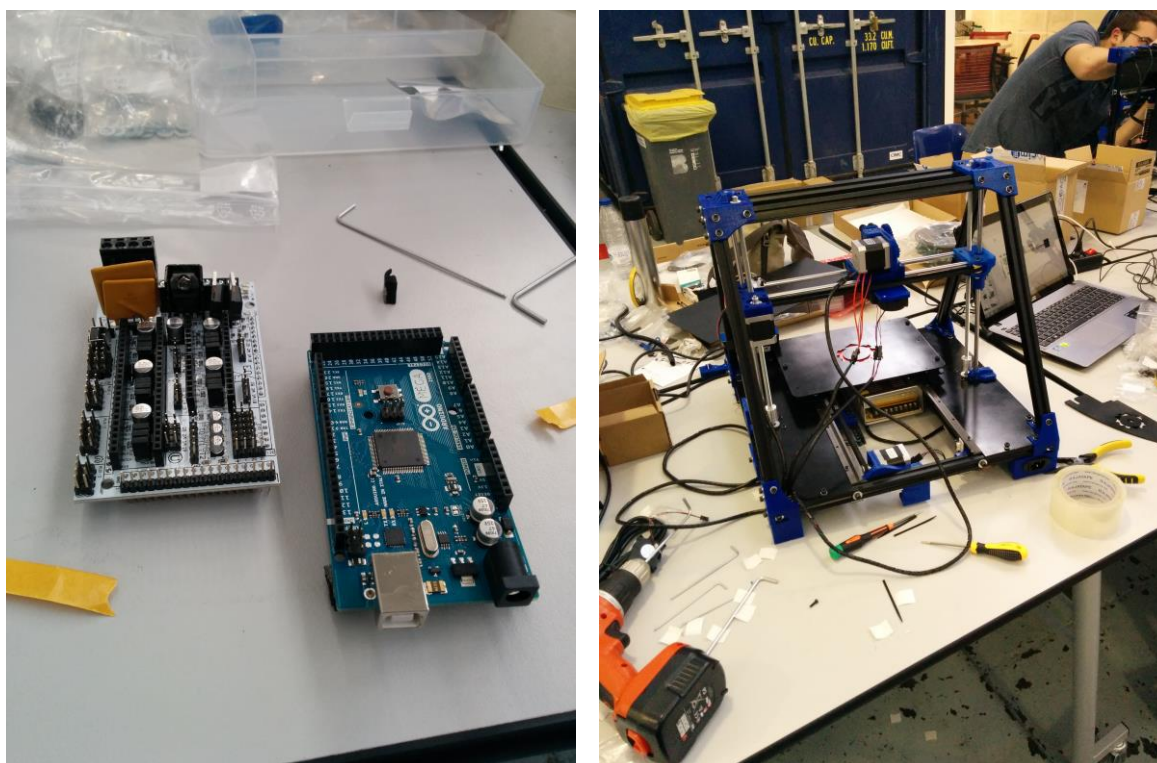


Figura 13.2. Izquierda: Placa de conexiones y Arduino Mega. Derecha: Instalación de todos los ejes



Figura 13.3. Unión entre Arduino Mega y placa de conexiones

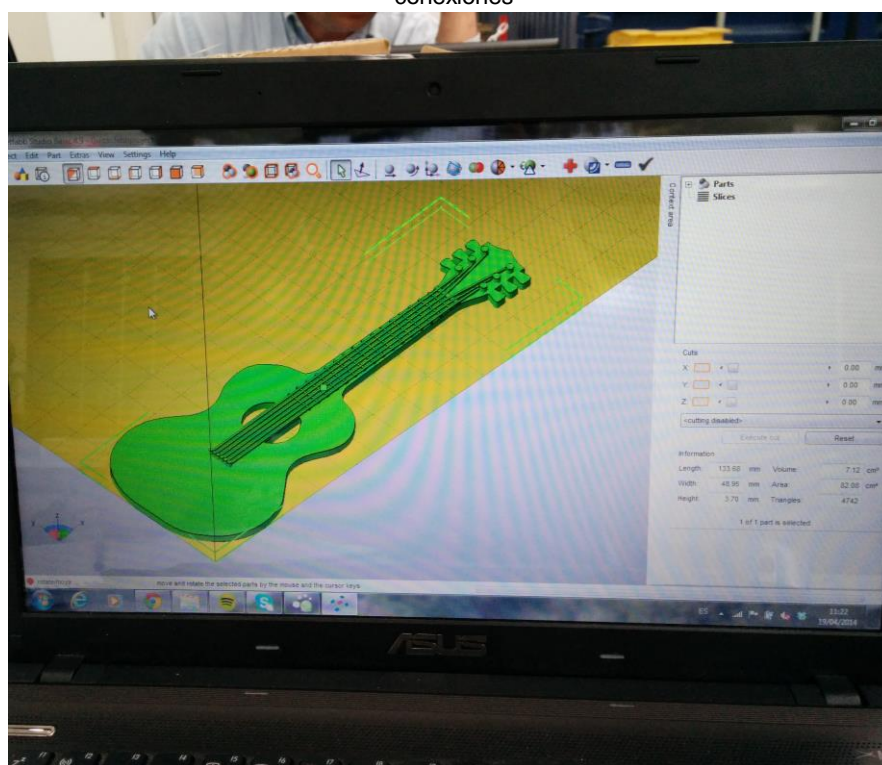


Figura 13.4. Programa de conversión y adaptación de la pieza 3D

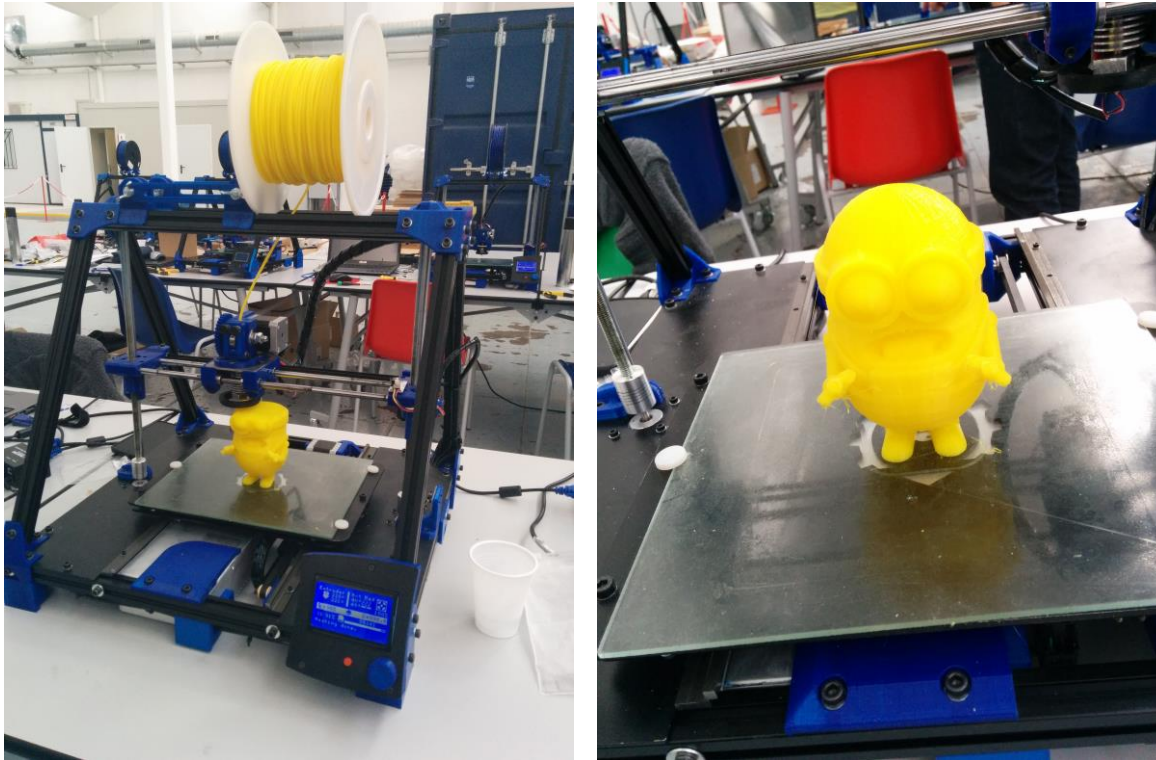


Figura 13.5. Izquierda: Proceso de impresión con la RepRapBCN3D+. Derecha: Resultado de la impresión 3D

Anexo 2: Hoja de características de la Kress 1050 FME





1050 FME



Motores para fresadoras
1050 FME

- + MAXX-Power Motor de 1050 vatios
- + Construcción más delgada para mejor ergonomía
- + Control de onda completa para mantener plena potencia a velocidad constante

Número de pedido: 06082201



Datos técnicos

Potencia nominal	1.050 Watt
Velocidad en vacío	10.000 – 29.000 1/min.
Pinza	8 mm
Casquillo-Ø	43 mm
Peso	1,7 kg

Características del producto

- + Arranque suave con limitación de corriente inicial
- + Embobinado del motor blindado para protegerlo contra el polvo y las partículas
- + Pestaña de acero inoxidable con cojinete doble para mayor resistencia
- + Protección electrónica de sobrecarga para evitar un sobrecalentamiento del motor
- + Escobillas auto-desconectables para proteger el motor
- + Adecuado para arranque de ondas flexibles
- + Cable de alimentación de 4 m con bloqueo de seguridad patentado
- + Disponible como accesorio en longitudes de 4 y 6 m

El conjunto incluye

Pinza de fijación de 8 mm

Informaciones de ruido y vibraciones

valor de emisiones de vibraciones a_v	5.0	m/s^2
valor de la incertidumbre de medida K	1.5	m/s^2
nivel de presión sonora L_{pA}	78	dB(A)
valor de la incertidumbre de medida K	3.0	dB(A)
nivel de potencia acústica L_{WA}	89	dB(A)
valor de la incertidumbre de medida K	3.0	dB(A)

L_{pA} = nivel de presión sonora valorado con A,
 L_{WA} = nivel de potencia acústica valorado con A
 K = valor de la incertidumbre de medida
 a_v = valor triaxial de emisiones de vibraciones
 Valores registrados según norma **EN 60745**.

Anexo 3: Cálculos de resistencia de materiales

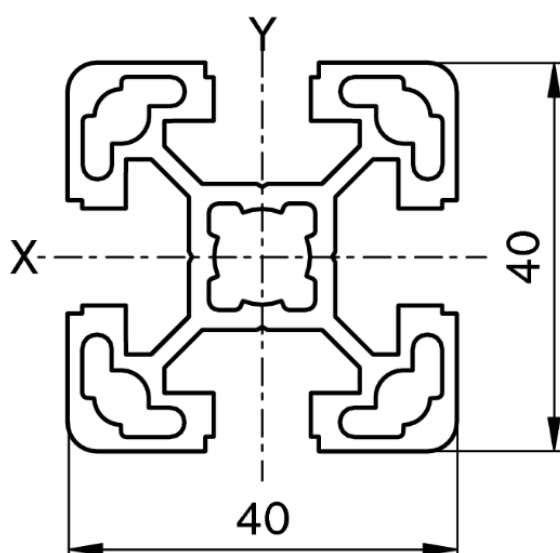
Selección de perfil

Para la elección de un perfil adecuado hay que asegurarse de que el elegido sea lo suficientemente rígido, lo suficientemente resistente y que se deforme poco.

Como valores de referencia, como todavía no se sabe cuánto puede pesar la máquina, se cogerá el peso de la fresadora de control numérico de referencia, 51 kg, sabiendo que la máquina que se piensa construir será más ligera debido a que será menos compacta y usará materiales más ligeros como el aluminio como base estructural.

Por comodidad para poder manejar la máquina y poder añadirle los sistemas de control y otros elementos aprovechando las ranuras, se quiere evitar un perfil demasiado pequeño, pues ello impediría hacer agujeros grandes en él para la colocación del husillo. Un perfil demasiado grande tampoco es deseable ya que hará que la máquina sea más grande y más pesada, por lo que se busca un compromiso entre ambos puntos que garantice unas buenas propiedades.

Para ello se escoge probar con el perfil 40x40 y se calculará el efecto que tendría una carga de 51 kg de peso, caso muy exagerado de la situación que se podría encontrar, en una barra de este tipo fijada por ambos extremos (esto último será el caso de todas las barras del diseño).



Los datos de este perfil sacados de la página del fabricante *Bosch Rexroth* son los siguientes:

Módulo de Young $E = 70\,000 \text{ N/mm}^2$

Momentos de inercia: $I_x = I_y = 9,00 \text{ cm}^4$

Módulo de sección: $W_x = W_y = 4,50 \text{ cm}^3$

Figura 13.6. Esquema de sección perfil hepco 40x40

A partir de estos datos, y cogiendo una longitud de referencia de 1000 mm se pueden efectuar los cálculos siguientes.

Desplazamiento vertical:

$$d = \frac{F \times L^3}{192 E x I \times 10^4} = 0,41 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 13.1})$$

Tensión: (sabiendo que la tensión de límite elástico está en 200 N/mm²)

$$\sigma = \frac{F \times L}{8 W \times 10^3} = 13,88 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Ec. 13.2})$$

Siendo F la fuerza actuando sobre la barra ($F=m \cdot a=51 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2$), L su longitud (en mm), E su módulo de Young y I su momento de inercia. Un desplazamiento de 0,41 mm es apenas apreciable y la tensión que aparece es mucho menor al límite elástico, con semejante sistema de carga y sin contar el reparto de esta fuerza entre toda la estructura que habría en el caso real, por lo que este desplazamiento es mucho mayor de que se puede esperar obtener en el caso real.

Estos resultados, junto con la comodidad que ofrece un perfil de 40x40 hace que se decida emplear este perfil como material base para la estructura de la máquina.

Diámetro del husillo

Una vez escogido el perfil, se pasa al estudio del tamaño del husillo a emplear. Puesto que, en algunos casos, el husillo tendrá que encajarse dentro de la estructura del perfil, ya queda totalmente restringido el uso de diámetros grandes que puedan comprometer la estructura de las barras del perfil, por lo que se usarán husillos de diámetro inferior a 20 mm. Al consultar páginas y catálogos de proveedores, se ha podido ver que los husillos habituales son de diámetros concretos, siendo los más relevantes los de 12, 16 y 20 mm (los demás quedan fuera por su tamaño demasiado grande). Al combinar esto con consejos y detalles de máquinas de control numérico, el diámetro aconsejado era el de 16mm. Habrá que comprobar pues, en las mismas condiciones extremos que en el apartado anterior, el comportamiento de un husillo de 1000 mm de largo bajo el efecto de una carga de 51 kg.

Datos del husillo:

Diámetro 16mm

Densidad acero inoxidable 7,96 g/cm³

Módulo de Young 187 500 N/mm²

$$I = \frac{1}{2} M \cdot R^2 = 0,51 \text{ cm}^4 \quad (\text{Ec. 13.3})$$

$$W = \frac{\pi \cdot R^3}{4} = 0,402 \text{ cm}^3 \quad (\text{Ec. 13.4})$$

Desplazamiento vertical:

$$d = \frac{F \times L^3}{192 E x I \times 10^4} = 0,0027 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 13.5})$$

Tensión: (siendo la tensión de límite elástico del acero inoxidable de 205 N/mm²)

$$\sigma = \frac{F \times L}{8 W \times 10^3} = 155,41 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Ec. 13.6})$$

Nuevamente se puede constatar que se cumple perfectamente con los requisitos solicitados considerando esfuerzos mucho mayores de los reales que se encontrarán. El valor de desplazamiento es idóneo ya que cuanto mayor fuera ese desplazamiento vertical, más difícil sería hacer girar el husillo y más probabilidades habría de estropear o romper algo en la máquina.

Anexo 4: Selección del motor paso a paso

Para la elección de un motor para la máquina que mueva los diferentes ejes de funcionamiento es imprescindible saber el par necesario para mover la estructura.

Para ello se hace un cálculo muy simple del par que tiene que hacer el husillo de 16mm para poder mover el conjunto de la estructura. Para ello se considerará el peso aproximado de la máquina diseñada, de unos 51 kg. El eje que más fuerza tendrá que hacer para mover la estructura es el eje longitudinal. Por la distribución de la máquina se considera que ese eje tiene que mover la mitad del peso de la máquina, siendo la estructura base fija apoyada más grande y ancha y contando que se pretende instalar dos husillos en ese eje, dividiendo por dos la fuerza necesaria para mover el conjunto en cada husillo. Con esto resulta que se tiene un par necesario de:

$$\Gamma = F \cdot d = \frac{\frac{1}{2} \cdot 51 \text{ kg} \cdot \frac{9.8 \text{ m}}{\text{s}^2} \cdot 0,008 \text{ m}}{2} = 1 \text{ Nm} \quad (\text{Ec. 13.7})$$

Este par necesario es superior al que se necesitará en la máquina real por la diferencia de peso que existirá entre ambas. Teniendo este par de referencia se puede empezar a hacer una selección entre motores, descartando aquellos que no lleguen a estos valores de par.

Combinando esto con las consultas a páginas de fabricantes, foros de aficionados a las máquinas CNC o la propia máquina de referencia, se ha visto que todos aconsejan muy fuertemente el empleo del motor Nema 23. Viendo el gráfico de su modo de funcionamiento incluido en su ficha técnica (adjuntada a continuación), este par permitiría al motor a girar a hasta unas 150 revoluciones por minuto, más que suficiente para obtener un buen avance de la máquina que no dañe a la herramienta ni a la madera mecanizada ni haga aparecer fuerzas mayores que puedan comprometer la estructura de la máquina. Una velocidad de giro de 150 rpm con un husillo de paso 5 mm implica que la longitud del eje Y (1200 mm) se recorrería en:

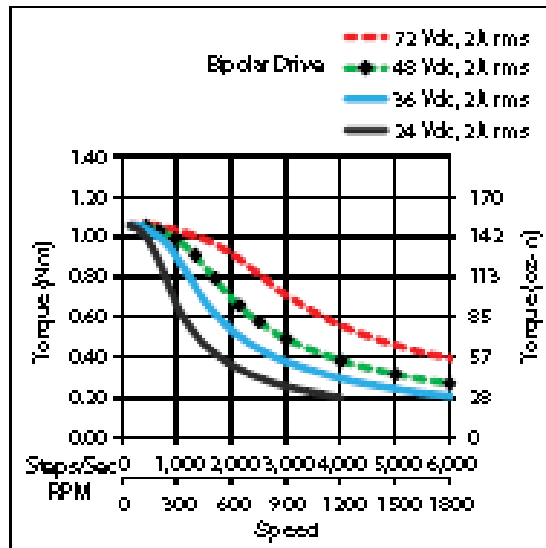
$$t = \frac{1200 \text{ mm}}{150 \text{ vueltas/min} \cdot 5 \text{ mm/vuelta}} = 1,6 \text{ min} \quad (\text{Ec. 13.8})$$

Teniendo en cuenta que la máquina diseñada será más ligera, se necesitará un par menor y por lo tanto se podrían alcanzar velocidades de giro mayores, tal y como se puede ver en el gráfico, haciendo disminuir este tiempo de recorrido.

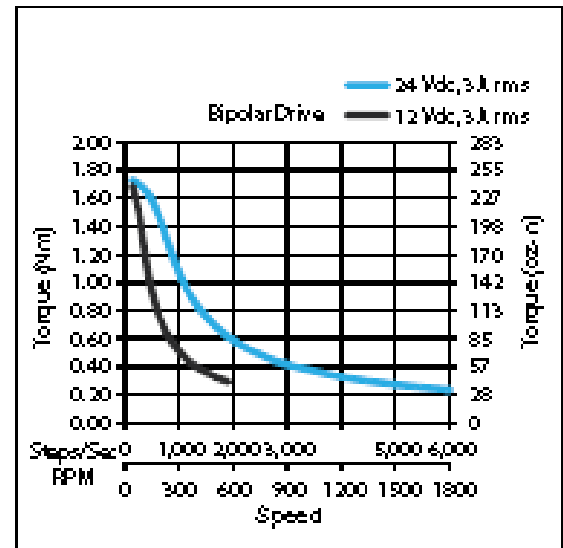


NEMA 23 Stepper Motor

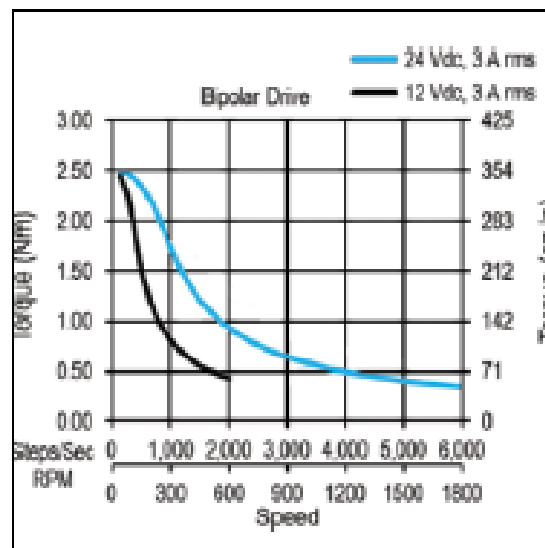
*Performance curves apply to continuous duty cycles.
Consult factory for intermittent cycles or other voltages.



Single Stack



Double Stack



Power Plus (Triple Stack)